Untersuchungen an Karbongesteinen zur Klärung von Gebirgsdruckfragen

Von der

TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZU BRESLAU

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs genehmigte

DISSERTATION

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. OTTO MÜLLER aus Horka (O.-L.)

Referent: o. Professor Dr.-Ing. G. Spackeler

Korreferent: a.o. Professor Dr. phil. E. Bederke

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Juli 1930

Sonderabdruck aus den Heften 47 und 48 des Jahrgangs 1930
der Berg- und Hüttenmännischen Zeitschrift »Glückauf«.

Untersuchungen an Karbongesteinen zur Klärung von Gebirgsdruckfragen

Von der
TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZU BRESLAU
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs genehmigte
DISSERTATION

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. OTTO MÜLLER aus Horka (O.-L.)

Referent: o. Professor Dr.-Ing. G. Spackeler
Korreferent: a.o. Professor Dr. phil. E. Bederke

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Juli 1930

1930
Verlag Glückauf, G. m. b. H., Essen

Es ist mir eine angenehme Pflicht, meinem hochverehrten Lehrer und Chef, Herrn Professor Dr.-Ing. Spackeler, an dieser Stelle für die Anregung zu dieser Arbeit sowie für das rege Interesse während der Anfertigung und für die genossene Unterstützung meinen verbindlichsten Dank auszusprechen.

Tatkräftige Unterstützung fand ich bei dem Institut für technische Mechanik an der Technischen Hochschule Breslau (Professor Dr.-Ing. Mann) sowie bei dem Institut für technische Mechanik und Aerodynamik an der Universität Göttingen (Professor Dr.-Ing. Prandtl) durch die Überlassung von Apparaten; ich spreche ihnen hiermit meinen besten Dank aus.

Herrn Bergrat Kurt Seidl, Breslau-Pielahütte, danke ich bestens für die Stiftung der Stahlformen.

Ferner danke ich Herrn Dipl.-Ing. Dr. phil. nat. W. Marx sowie Herrn Dipl.-Ing. H. Wöhlbier für die Beratung und tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Für die mühevolle Anfertigung der Probekörper bin ich dem Laboratoriumswerkmeister, Herrn Seibert, zu Dank verpflichtet.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meiner lieben Mutter gewidmet.

Im bergmännischen Schrifttum der letzten Jahre ist die Frage des Gebirgsdruckes als Ursache und Folgeerscheinung von Abbauwirkungen, namentlich für den Steinkohlenbergbau, mehrfach erörtert worden. Obschon die Meinungen der einzelnen Forscher über die Größe und Richtung der auftretenden Gebirgsspannungen noch stark voneinander abweichen, stimmen sie doch darin überein, daß für die Gesamterscheinungen in gleichem Maße der geologische Aufbau des betreffenden Kohlengebietes wie die Abbauwirkungen bestimmend sind.

Die in den Gruben beobachteten und in der Literatur gewürdigten Erscheinungen, wie Senkungsvorgänge des Hangenden, Entstehung von Drucklagen im Flöz, zeitweilig auftretende Mächtigkeitsänderungen der Kohle, Druckhaftwerden von Strecken usw., haben neuerdings hauptsächlich zu zwei Annahmen für ihre Erklärung geführt. Die eine besagt kurz, daß die Gesteine durch die bergmännische Einwirkung beim Abbau eine Art von Umformung erfahren, welche die beobachteten Tatsachen verursacht. Die andere Annahme weist auf die Bedeutung des elastischen Arbeitsvermögens der Gesteine hin und sucht daraus die Erscheinungen zu erklären.

Bei diesen Vorgängen handelt es sich zweifellos um mechanische Wirkungen des Gebirges. Dann entsteht die Frage, in welcher Weise sich die Karbongesteine unter den natürlichen Verhältnissen der Tiefe mechanischen Beanspruchungen gegenüber verhalten. Als solche betrachtet man in der Materialprüfung allgemein Beanspruchungen, die durch Druck-, Zug-, Biegungs- und Scherkräfte hervorgerufen werden. Die stetig wachsende Aufmerksamkeit, die man in den bergmännischen Kreisen den gesamten Gebirgsdruckfragen, zumal im Steinkohlenbergbau, entgegenbringt, berechtigt zu dem Versuch, zu ihrer Klärung auf experimentell-wissenschaftlichem Wege beizutragen. Wenn es gelingen sollte, aus den auf versuchsmäßiger Grundlage aufgebauten Untersuchungen Schlüsse zu ziehen, welche mechanischen Beanspruchungen z. B. einen für die Gewinnung nützlichen Abbaudruck erzeugen, oder wie Gesteinschichten bei bergmännischen Arbeiten behandelt werden müssen, so wäre damit dem Bergbau sicherlich auch wirtschaftlich gedient. Nachstehend soll also versucht werden, einen Beitrag zur Klärung der Abbau- und Gebirgsdruckfragen zu geben.

Bevor die Ergebnisse der vom Verfasser angestellten Versuche an Karbongesteinen mitgeteilt und mit den entsprechenden Erscheinungen in der Grube kritisch verglichen werden, sollen kurz die wichtigsten der bisher im Schrifttum bekanntgewordenen Versuche über Festigkeit, Elastizität und Plastizität der Gesteine aufgeführt werden. Ferner ist noch zu erörtern, ob und inwieweit Laboratoriumsversuche die Verhältnisse im großen widerspiegeln und welche Prüfverfahren für derartige Versuche in Betracht kommen können.

Für die bei einer Prüfung von Gesteinen ermittelten Festigkeitsgrade werden oft Bezeichnungen wie fest, spröde, plastisch und elastisch gebraucht, wodurch leicht Mißverständnisse entstehen. Deshalb sei kurz auf eine neuere Begriffsbestimmung hingewiesen. Gutenberg[1] hat zur Kennzeichnung eines Gesteins den Begriff der »Righeit« eingeführt; er versteht darunter die elastische Widerstandsfähigkeit gegenüber Formänderungen. Erleidet ein fester Körper durch auf ihn wirkende mechanische Beanspruchung eine Formänderung, so behält er sie entweder bei (z. B. Wachs) oder er sucht seine ursprüngliche Form wieder einzunehmen (z. B. Gummi). Im ersten Falle spricht man von einem bildsamen, plastischen Zustand, im zweiten von einem elastischen, wenn auch der Körper meist nicht völlig in seine Anfangslage zurückgeht (elastische Nachwirkung oder elastische Hysterese). Ein Körper kann trotz sehr geringer Nachgiebigkeit gegen Formänderungen, also bei großer Righeit, gleichzeitig den plastischen Zustand beibehalten, wenn er diese geringe Formänderung vollständig behält. Umgekehrt besitzt z. B. Gummi als ein Körper mit geringer Righeit keine Plastizität, da er nach dem Aufhören der Kraftwirkung schnell seine Anfangsform wieder einnimmt.

Unter Plastizität der Gesteine wird von den Forschern die Fähigkeit verstanden, auftretenden Beanspruchungen nicht mehr den Widerstand entgegenzusetzen, den die Gesteine unter dem Druck und der Temperatur an der Oberfläche besitzen. Für die Karbongesteine entsteht die Frage, unter welchen Begriff sie sich einreihen lassen. Die in der Literatur angegebenen Erscheinungen können den Anschein erwecken, daß sie unter den jeweiligen Bedingungen teils als plastisch, teils als rig anzusehen sind.

Inwieweit Laboratoriumsversuche, die zwangsläufig nur mit kleinen Mengen arbeiten, Rückschlüsse auf räumlich große Gebirgsteile zu ziehen erlauben, mag vorläufig dahingestellt bleiben, jedoch besteht in der Materialprüfung die allgemein anerkannte Anschauung, daß die Versuchsergebnisse bei möglichst naturgetreuer Nachbildung der Verhältnisse im großen dem absoluten Wert nach verhältnisgleich sind. Bei experimenteller Untersuchung des Gesteinverhaltens in der Tiefe muß jedoch ein Umstand beachtet werden. Das ist der Faktor Zeit, der bei allen Naturgeschehen von großer Bedeutung ist, bei Versuchen aber nur schwer berücksichtigt

[1] Gutenberg: Lehrbuch der Geophysik, 1926, S. 451.

werden kann. Wie später noch ausgeführt wird, wirkt er im Sinne einer Erhöhung der Plastizität der Gesteine. Er könnte beim Versuch durch Temperaturerhöhung ersetzt werden, wenn das Verhältnis zwischen Zeitdauer und Temperaturerhöhung bekannt wäre oder sich errechnen ließe.

Eine andere Frage ist, welches Prüfverfahren bei Gesteinuntersuchungen den natürlichen Verhältnissen entspricht oder sich ihnen möglichst nähert, da die zu untersuchenden Gesteine in der Tiefe wegen der beschränkten Ausweichmöglichkeit unter allseitiger Spannung stehen. Diesen Zustand haben die weiterhin genannten Forscher bei ihren Untersuchungen auf verschiedene Weise herzustellen versucht.

Die bisher bekanntgewordenen Untersuchungen an Naturgesteinen.

Gesteinfestigkeit.

Festigkeitsversuche an Gesteinen sind zwar schon lange bekannt, haben jedoch nur bauwissenschaftlichen Zwecken und nicht gebirgswissenschaftlichen Fragen gedient. Aus den Berichten über die mannigfachen Versuche Föppls[1], Rinnes[2], Gehlers[3] u. a. geht hervor, daß die ermittelten Werte je nach Art der angewandten Versuchsbedingungen stark voneinander abweichen. Bemerkenswert ist ferner, daß die Anordnung der Probekörper unter der Gesteinpresse, je nachdem ob die Druckrichtung parallel oder senkrecht zu den Schichten steht, das Ergebnis weitgehend beeinflußt. Allgemein werden bei Druck senkrecht zur Schichtung höhere Festigkeitswerte erhalten als bei Druck parallel dazu. Die wenigen in der Literatur bekanntgewordenen Festigkeitsversuche an Karbongesteinen[4] leiden daran, daß auf diesen Umstand nicht genügend geachtet worden ist. Für bergmännische Druckfragen kann die Ermittlung der Druckfestigkeit nur einen geringen Anhalt bieten, weil der gewöhnliche Druckversuch unter Bedingungen ausgeführt wird, die den natürlichen Verhältnissen in der Grube nicht entsprechen, denn der Probekörper vermag beim Versuch nach 4 Seiten auszuweichen. Im allgemeinen wird es sich bei den Abbau- und Gebirgsdruckfragen nicht um einheitliche mechanische Vorgänge (reine Druckbeanspruchung) handeln, sondern daneben treten hier wie bei den Senkungsvorgängen noch Kräfte auf, welche die Gesteine auf Zug-, Biegungs- und Schubfestigkeit beanspruchen. Experimentelle Untersuchungen von Bauschinger[5] und Hanisch[6] haben bewiesen, daß die Gesteine bei Zugbeanspruchung den niedrigsten Wert ergeben; dann folgen die Schub-, die Biegungs- und zuletzt die Druckfestigkeit.

Elastizität der Gesteine.

Die Bedeutung der elastischen Konstanten von Naturgesteinen ist erst in jüngster Zeit, besonders von der Geophysik und der Straßenbauforschung, erkannt worden. Unter Elastizität wird im Sprachgebrauch die Fähigkeit eines Körpers verstanden, nach Aufhören einer auf ihn wirkenden Beanspruchung wieder seine ursprüngliche Gestalt anzunehmen; bei dieser Auffassung handelt es sich weniger um die Größe der Beanspruchung, welche die elastische Formänderung bedingt, als um das Ausmaß der bruchfrei erreichbaren Verformung. Von diesem allgemeinen Begriff weicht der der physikalischen Elastizität wesentlich ab. Ein Körper ist im physikalischen Sinne desto elastischer, je größer die aufzuwendende Belastung ist, damit er eine Formänderung (z. B. Dehnung) erfährt. Der E-Modul ist der reziproke Wert der Dehnungszahl α und also desto größer, je geringer die bei der Einheitsbelastung erfolgte Dehnung ist. Die Größe des E-Moduls kennzeichnet somit gleichzeitig die höhere Elastizität eines Stoffes. Aus der Größe des E-Wertes kann man ersehen, wie sich die Karbongesteine auftretenden Beanspruchungen gegenüber verhalten, ob sie imstande sind, diese ganz oder nur teilweise in sich aufzunehmen, und in welchem Maße sie nach Fortfall der Beanspruchung die in ihnen aufgespeicherten Kräfte wieder an ihre Umgebung abzugeben vermögen. Diese Frage ist für die gesamte Unfallbekämpfung (Stein- und Kohlenfall, Gebirgsschläge, Gasausbrüche) ebenso wie für die wirtschaftliche Ausnutzung des Gebirgsdruckes gleichermaßen bedeutsam. Aus den Arbeiten von Bauschinger[1], Graf[2], Kusakabe[3], Adams[4], Breyer[5], Hess[6], Reich[7] u. a. sind die Faktoren bekanntgeworden, welche die Gesteinelastizität beeinflussen, nämlich petrographische Zusammensetzung, Alter, Entstehungsart, Porenvolumen und Wassergehalt. Für Gebirgsdruckfragen ist die Erscheinung der elastischen Anisotropie aller geschichteten und geschieferten Sedimente besonders wichtig. Diese zeigen nämlich recht verschiedene E-Werte, je nachdem der Druck senkrecht oder parallel zur Schichtfläche wirkt: bei Druck senkrecht zur Schichtung ist die Elastizität niedriger als bei dem Druck parallel dazu. Für Karbongesteine sind Elastizitätszahlen auf statischer Grundlage bisher nicht bekannt. Hilgenstock[8] glaubte auf Grund seiner Versuche, »einen Beweis für die Elastizität der Kohle gefunden zu haben«. Sein Wert von 2% federnder Zusammendrückung ist aber so groß, daß er durch die meines Erachtens für die Messung der Elastizität ungenügende Versuchseinrichtung beeinflußt sein dürfte. Gutenberg[9] hat den E-Wert von Steinkohle zu $2{,}0 \cdot 10^{11}$ CGS-Einheiten aus der Dichte und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der longitudinalen Wellen bestimmt.

[1] Föppl: Die Abhängigkeit der Bruchgefahr von der Art des Spannungszustandes, Mitteil. mech.-techn. Labor. T. H. München 1900, H. 27.

[2] Prandtl und Rinne: Referat über durchgeführte vergleichende Untersuchungen über die Methoden zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Gesteinen, Kali 1909, S. 360; N. Jahrb. Min. 1907, S. 45.

[3] Gehler: Würfel- und Säulenfestigkeit als Grundlage der Betonprüfung, Bauingenieur 1928, S. 24.

[4] Strength of roof supports, Coll. Guard. 1929, Bd. 139, S. 803; Mitteilungen der Königl. Techn. Versuchsanstalt 1883; Bericht der Preußischen Stein- und Kohlenfallkommission, 1903, S. 147; Cordebas: Diaclases et failles, Mines Carrières 1928, S. 121; Hilgenstock: Untersuchungen über die wechselnde Kohlenfestigkeit und ihren Einfluß auf das Lohnwesen, Glückauf 1909, S. 1857.

[5] Bauschinger: Versuche über Elastizität und Festigkeit usw., Mitteil. mech.-techn. Labor. T. H. München 1884, H. 10.

[6] Hanisch: Bestimmung der Biegungs-, Zug-, Druck- und Schubfestigkeit an Bausteinen der österreichisch-ungarischen Monarchie, 1901.

[1] Bauschinger: Untersuchungen über die Elastizität und Festigkeit der wichtigsten natürlichen Bausteine in Bayern, Mitteil. mech.-techn. Labor. T. H. München 1884, H. 10.

[2] Graf: Versuche über Druckelastizität, Beton Eisen 1926, S. 399.

[3] Kusakabe: On the modulus of elasticity of rocks, Comm. Colleg of Science Univ. Tokyo 1905, Bd. 20, Art. 9.

[4] Adams und Coker: An investigation into the elastic constants of rocks, Carnegie Inst. Washington 1906, Nr. 46.

[5] Breyer: Über die Elastizität von Gesteinen, Z. Geophys. 1930, H. 2, S. 98.

[6] Hess: Elastizität trockner und feuchter Gesteine, Zentralbl. Min. 1912, S. 471.

[7] Reich: Die elastischen Eigenschaften der Gesteine, Gerlands Beitr. Geophysik 1927, S. 86.

[8] Glückauf 1909, S. 1857.

[9] a. a. O. S. 507.

Plastizität der Gesteine.

Neben der Gesteinfestigkeit und dem elastischen Verhalten wird als Erklärung für die Druckerscheinungen noch die Verformbarkeit oder die Plastizität unter Druck angeführt. Die Frage der Gesteinplastizität in der Tiefe hat wohl zuerst Heim[1] 1878 behandelt. Er nahm eine allseitige Druckverteilung an und folgerte, daß die Gesteine in großer Teufe in einen Zustand der »latenten Plastizität« geraten. Der plastische Zustand kann natürlich nur erreicht werden, wenn die das Gestein aufbauenden Minerale plastisch zu werden vermögen. Zahlreiche Beweise in der Natur sowie die theoretische kristallographische Behandlung der Frage in Verbindung mit Untersuchungen durch Lehmann[2], Mügge u. a.[3] bestätigen die plastische Formänderung von Mineralien. Versuche von Tresca[4], Spring u. a.[5] haben erwiesen, daß zunehmender Druck und zunehmende Temperatur die Plastizität fester Körper günstig beeinflussen. Versuche Föppls[6] zeigten, daß Kalk- und Sandsteine noch bei einem allseitig gleichen Druck von 3000 at unbeschädigt blieben. Trotzdem geht es nicht an, aus diesem Verhalten Rückschlüsse auf das Gesteinverhalten in einer diesem hohen Druck entsprechenden Tiefe zu ziehen, da sich nicht immer für feste Körper in großer Tiefe hydrostatischer, also allseitig gleicher Druck, annehmen läßt. Dieser kann nur für eingeschlossene Gase und Wasser gelten. Versuche über plastische Formänderungen gelangen zuerst Kick[7], der Marmorkugeln ohne Lösung des Zusammenhanges unter allseitigem Druck abplattete und Marmor prägte. Eine vergleichende Wiederholung und ein weiterer Ausbau dieser Versuche erfolgte durch Rinne[8]. Frank D. Adams[9] und seine Mitarbeiter Nicolson und Coker[10] erzielten durch verbesserte Versuchsanordnung weitgehende plastische Formänderungen von Gesteinen. Sie wiesen den Einfluß der Faktoren Zeit und Temperatur auf den Deformationsvorgang nach. Ihre ausgedehnten Versuchsreihen bewiesen, daß die Gesteine unter erhöhter Temperatur leichter und rascher plastische Erscheinungen zeigen als bei normaler Temperatur. Eine genauere Bestimmung des bei Versuchen unter allseitigem Druck herrschenden Seitendruckes gab die von Kármán[11] gebaute Druckvorrichtung. Er erzielte bei Marmor und Sandstein plastische Formänderungen unter Ausbildung von Gleitlinien und fand im mikroskopischen Aufbau zwei Arten von Formänderungen. Er unterschied eine »intergranulare« Formänderung, wenn die Gleitungen nicht in den Kristallen, sondern zwischen ihnen erfolgten, und eine »intragranulare«, wenn sich Zwillingslamellenbildungen in den Kristallen erkennen ließen. Zuletzt sei noch auf die Versuche von Adams hingewiesen, der Gesteine mit senkrecht und waagrecht gebohrten durchgehenden Löchern unter hohen Druck setzte, um zu ermitteln, welcher Druck, welche Temperatur und welche Versuchsdauer nötig waren, damit die Löcher sich schlossen. Er bewies, daß Heim die Tiefe des »latent-plastischen« Zustandes der Gesteine stark unterschätzt hat.

Bei der Betrachtung der dem Aufsatz von Adams[1] beigegebenen Lichtbilder fällt eine bemerkenswerte Erscheinung an einem derart beanspruchten Solnhofener Kalkstein auf. Der zylindrische Prüfkörper ist, wie Abb. 1 zeigt, vorsichtig durchbrochen worden,

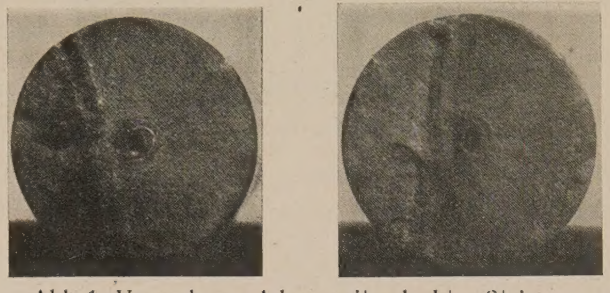


Abb. 1. Versuch von Adams mit gelochten Steinen.

und um das ellipsenförmig gewordene Loch ziehen sich mehrere Linien, die sich ebenfalls ellipsenartig verteilen. Diese Erscheinung könnte mit dem Verlauf der Trompeterschen Zone[2] verglichen werden, die sich als Zone des entspannten Gebirges um einen künstlichen Hohlraum herum bildet.

Eigene Versuche an Karbongesteinen.

Die vom Verfasser im bergmännischen Laboratorium der Technischen Hochschule Breslau ausgeführten Versuche an Karbongesteinen umfassen 5 verschiedene Gruppen, nämlich: 1. Versuche über Druckfestigkeit, 2. Versuche über Rißbildung in einer den natürlichen Verhältnissen ähnlichen Anordnung, 3. Versuche über die Plastizität der Gesteine nach den Verfahren von Kick und v. Kármán, 4. Versuche über das elastische Verhalten und 5. Versuche über die Zusammendrückbarkeit.

Als Versuchsmaterial dienten Gesteine aus dem oberschlesischen Karbon. Untersucht wurden nur die kennzeichnenden Karbongesteine aus der Sattelflözgruppe, nämlich je ein Tonschiefer aus dem Hangenden und dem Liegenden des Flözes Schuckmann-Niederbank, ein Sandschiefer aus dem Hangenden des Heinitzflözes, ein Sandstein aus dem Hangenden des Flözes Schuckmann-Niederbank und Steinkohle aus dem Schuckmann- und dem Heinitzflöz.

Zur Erleichterung der Übersichtlichkeit sollen die Ergebnisse der 5 Versuchsgruppen von Sandstein, Schiefer und Kohle für jede Gesteinart gemeinsam behandelt und dann für jedes Gestein die erzielten Werte mit dem Gesteinverhalten in der Grube kritisch verglichen werden. Zuvor wird über die Versuchs-

[1] Heim: Mechanismus der Gebirgsbildung, 1878, Bd. 2, S. 31.

[2] Lehmann: Flüssige Kristalle sowie die Plastizität der Kristalle, Z. physik. Chem. 1904, S. 267.

[3] Mügge: Über das Verhalten einiger Minerale der Salzlagerstätten, Nachr. Ges. Wissensch. Göttingen, Mathem.-physik. Klasse 1924; Tamann: Kristallisieren und Schmelzen, 1903, S. 162; Voigt und Drude: Elastizitätskonstanten dichter Mineralien, Wiedemanns Ann. 1891, Bd. 42, S. 537.

[4] Tresca, Mémoires présentés à l'Acad. de l'Inst. de France 1872, S. 75, 281 und 617.

[5] Spring, Bull. Acad. Belgique, Classe des sciences III, 1899, S. 790; Pfaff sowie Gümbel, s. Paulcke: Das Experiment in der Geologie, 1912, S. 32.

[6] Föppl: Versuche über die Wirkung eines allseitig gleichen Flüssigkeitsdruckes, Mitteil. mech.-techn. Labor. T. H. München 1900, H. 27, S. 6.

[7] Kick: Die Prinzipien der mechanischen Technologie und die Festigkeitslehre, Z. V. d. I. 1892, S. 919.

[8] Rinne: Umformung von Kalkspatkristallen und von Marmor unter allseitigem Druck, N. Jahrb. Min. 1903, Bd. 2, S. 160.

[9] Adams und Williamson: On the compressibility of minerals and rocks at high pressures, J. Franklin Inst. 1923, S. 475.

[10] Carnegie Inst. 1905, Nr. 45.

[11] v. Kármán: Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck, Z. V. d. I. 1911, S. 1748; Forschungsheft 118, S. 37.

[1] Adams: An experimental contribution to the question of the depth of the zone of flow in the earths crust, J. Geol. 1920, Bd. 20, S. 107.

[2] Langecker: Die Nutzbarmachung des Gebirgsdruckes für die Kohlengewinnung, Glückauf 1928, S. 1409.

ausführung berichtet, soweit sie nicht schon beschrieben worden ist.

Die Ausführung der Versuche.

Druckfestigkeitsversuche.

Für die Versuche stand eine 100-t-Baustoffpresse mit Druckspeicher zur Verfügung (Abb. 2). Die Druckfestigkeit des Gesteins wurde bei Ausübung des Druckes senkrecht und parallel zur Schichtung bzw. Lagerfläche des Gesteins bestimmt. Die Werte sind,

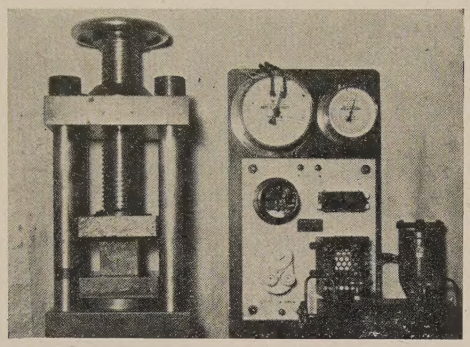


Abb. 2. Baustoffpresse für 100 t Druck.

wie es in dem Prüfverfahren für natürliche Gesteine[1] verlangt wird, auf volle 10 kg/cm² abgerundet. Die Versuchskörper hatten meist Würfel-, selten Zylinderform und waren mit Hilfe einer Gesteinsäge oder einer Diamantbohrkrone hergestellt worden. Nachdem die Stirnflächen planparallel geschliffen oder abgedreht waren, wurden die Versuchskörper unter harten Preßplatten gedrückt, jedoch zu deren Schonung bei sehr festen Gesteinen unter Benutzung von Beilagen aus Preßspan.

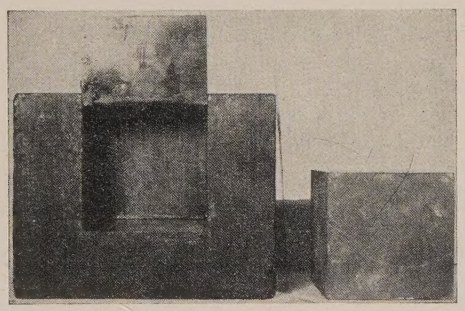


Abb. 3. Stahlform mit Druckstempel für Würfelversuche; rechts ein Probewürfel.

Versuche über Rißbildung.

Zur Klärung der Rißbildung in Strecken und Abbauen dienten einige Versuche an Karbongesteinen in einer Stahlform von der Pielahütte in Rudzinitz. Die Versuchsanordnung entsprach den Grubenverhältnissen darin, daß ein allseitiger Spannungszustand auf fünf Seiten des Probewürfels bestand, während auf die sechste Seite, die den Strecken- oder Abbaustoß darstellen sollte, der Spannungszustand der Atmosphäre wirkte. Dies erreichte man praktisch dadurch, daß in eine starkwandige Stahlform quadratischen Ausmaßes, die an einer Seite offen war, ein genau passender Stahlstempel den Druck auf den Versuchswürfel übertrug (Abb. 3). Die offene Seite stellte dann die freie Abbau- oder Streckenfläche dar, wohin der Körper eine Ausweichmöglichkeit hatte. Damit der Würfel nur dahin ausweichen konnte, schliff man ihn sehr genau in die Form ein und verfüllte etwaige kleine Zwischenräume sorgfältig mit Gips.

[1] Prüfverfahren für natürliche Gesteine, Din. D. V. M. 2102—2109.

Versuchseinrichtung nach dem Verfahren von Kick.

Die oben bereits gemachten Angaben über dieses Verfahren bedürfen noch einiger Ergänzungen.

Bei den ersten Versuchen wurde geschmolzenes Alaun als Einbettungsmittel gewählt. Dabei ergab sich, daß alle Gesteine nur Brucherscheinungen, aber keinerlei Verformungen zeigten. Der vom Alaun an den Körper weitergeleitete Druck war eben noch viel zu gering, so daß nur Stauchformen auftreten konnten (Abb. 4). Allein bei dem als Vergleichsmaterial gewählten Marmor traten völlig ähnliche Erscheinungen auf, wie sie von Rinne beschrieben

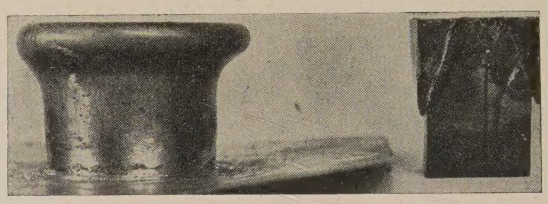


Abb. 4. Gestauchte Kupferhülse mit in Alaun gebettetem Tonschieferprisma; rechts der herausgenommene Körper.

worden sind. Abb. 5 zeigt links die gestauchte Kupferhülse, in die der Marmorzylinder eingebettet war, und rechts den umgeformten Körper, der eine starke Verbreiterung von 22 auf 28 mm und eine Höhenverminderung von 27 auf 20 mm aufweist. Auf der Oberfläche des Marmors erkennt man fein ausgeprägte Linien, die als Fließfiguren oder Mohrsche Linien angesehen werden. Der von zwei sich kreuzenden Linien gebildete Winkel beträgt etwa 48°.

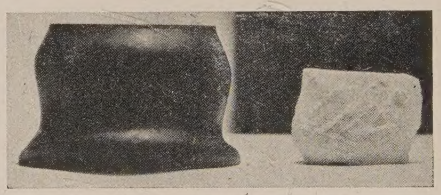


Abb. 5. Marmorzylinder mit Gleitlinienbildung.

Auf der Suche nach einem Stoff, der den allseitigen Druck besser übertragen sollte, wurden dann Versuche mit Quecksilber vorgenommen. Hierbei traten infolge der geringen Zusammendrückbarkeit bald Risse in der Kupferhülse auf, durch die das unter hohem Druck stehende Quecksilber explosionsartig herausschoß (Abb. 6). Wiederum waren nur Bruchformen erzielt worden. Bessere Ergebnisse brachten Versuche mit Lötzinn und Blei, also mit

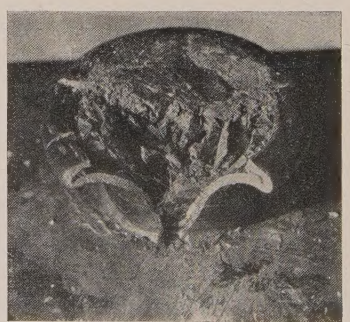


Abb. 6. Versuch mit Quecksilber.

Stoffen, die eine ausgesprochene Fließfähigkeit haben und weitgehend plastisch verformt werden können.

Versuchseinrichtung nach dem Verfahren von Kármán.

Das Grundsätzliche der Druckvorrichtung von Kármán besteht darin, daß 2 hydraulische Pressen so zueinander geschaltet werden, daß die erste den achsrechten Druck auf den zylindrischen Probekörper überträgt, während die zweite den Seiten- oder Manteldruck bewirkt; beide Drücke

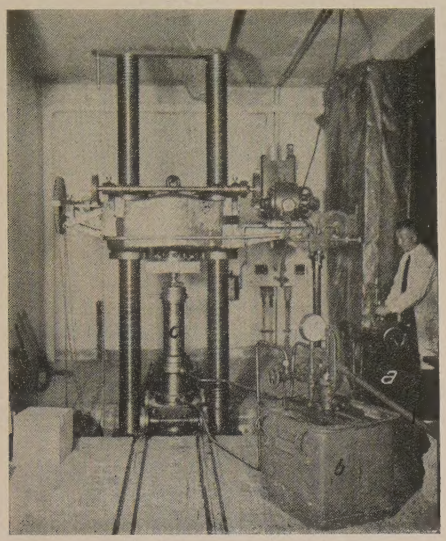


Abb. 7. Baustoffpresse für 500 t Druck.

können in weiten Grenzen geregelt werden. Die Versuchseinrichtung und -durchführung hat Kármán eingehend beschrieben. In der die Versuchsanordnung veranschaulichenden Abb. 7 ist *a* die Presse für den achsrechten Hauptdruck, *b* die Presse für den Manteldruck, *c* die zwischen die Preßplatten einer 500-t-Baustoffpresse eingebaute Druckvorrichtung.

Versuchsanordnung für die Bestimmung des E-Moduls.

Aus größern, möglichst rißfreien Gestein- und Kohlenblöcken wurden Prismen von etwa 10×10×20 cm herausgeschnitten und die Grundflächen genau planparallel geschliffen. Unter der Baustoffpresse erfolgte dann der zentrische Einbau der Proben, wobei man darauf achtete, daß das Kugellager der obern Preßplatte vollständig eben gerichtet war, damit die Stirnflächen der Prismen völlig an den Preßplatten

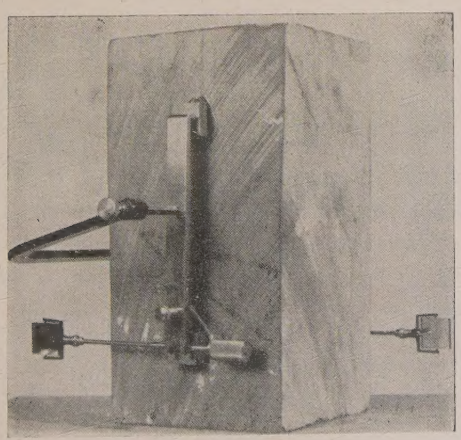


Abb. 8. Gesteinprisma mit angesetzten Spiegelgeräten.

anlagen. Zur Messung der elastischen Formänderung dienten Spiegelgeräte der Bauart Martens, wie man sie für derartige Untersuchungen hauptsächlich benutzt. Zwei dieser Geräte werden an 2 gegenüberliegenden Längsseiten des Prismas angesetzt (Abb. 8). Erfährt nun das Prisma durch Belastung oder Entlastung eine Längenänderung innerhalb der Meßlänge, so wird eine Drehbewegung der Spiegelschneiden, also auch der Spiegel erfolgen, deren Größe mit Hilfe eines Fernrohres an einem Maßstab gemessen wird. Die Meßgenauigkeit beträgt dabei $^1/_{10\,000}$ mm. Für die Ausführung einer derartigen Messung sei auf das Schrifttum[1] verwiesen. Infolge der Messung mit zwei Geräten an zwei gegenüberliegenden Prismenseiten (Fasern) können etwa eintretende Bewegungen des Prismas keinen Einfluß auf das Ergebnis ausüben. Bei den Versuchen wurde die Belastung möglichst gleichmäßig und ruhig um einen etwa gleichen Betrag bis zu einem Höchstwert gesteigert, der vorher durch Druckversuche bestimmt worden war; man ging nur bis zur halben Bruchbelastung, damit nicht etwa ein Bruch die Spiegelgeräte beschädigte. Ebenso gleichmäßig wurde die Last bis auf den Nullwert verringert. Man erhielt also elastische Belastungs- und Entlastungskurven.

Versuchsanordnung für Kompressionsversuche unter allseitigem Druck.

Versuche, bei denen man die Zusammendrückung von Karbongesteinen unter allseitigem Druck mißt, werden Aufschluß darüber geben können, ob die für manche Brucherscheinungen neuerdings aufgestellte Behauptung des »latenten Arbeitsvermögens« der Gesteine[2] zu Recht besteht. Zur Klärung der Frage der Zusammendrückbarkeit wurde folgende Versuchseinrichtung verwendet.

Um reine Zusammendrückungen zu ermöglichen, mußte man die Einrichtung so treffen, daß ein Zerbrechen oder ein seitliches Ausweichen der Probekörper ausgeschlossen war. In diesem Punkte unterscheidet sich dieser Versuch wesentlich von den Prüfungen über die Druckfestigkeit und das elastische Verhalten. Bei dem Versuch der ersten Art konnten sich die Körper ungehindert breiten, und es kam bei Überschreitung der Bruchgrenze zu Formänderungen unter Brucherscheinungen. Im zweiten Falle, bei dem die Größe der Druckspannung unterhalb der Bruchbelastung liegt, traten plastische und elastische Formänderungen ein, die nicht von Bruchformen begleitet waren. Die eingangs erwähnte Forderung der seitlichen Unnachgiebigkeit wurde praktisch dadurch erreicht, daß man den zu prüfenden Gesteinkörper in eine starkwandige, runde Stahlhülse von 40 mm Durchmesser und 100 mm Höhe sehr genau einpaßte und einschliff. Die Druckübertragung erfolgte durch einen gleichfalls gut eingeschliffenen Stahlstempel. Damit der Körper nach dem Versuch ohne Beschädigung herausgenommen werden konnte, war die Hülse am Fuß mit einem starken, abnehmbaren Stahluntersatz versehen. Etwaige Zwischenräume zwischen Versuchskörper und Stahlwand, die jedoch in keinem Falle größer als $^1/_{10}$ mm waren, wurden dadurch ausgefüllt, daß man den Körper mit Paraffin überzog und ihn dann allmählich in die Form eindrückte. Daß

[1] Martens: Materialienkunde für den Maschinenbau, 1898, S. 49; Wawrciniok: Handbuch der Materialprüfung, 1923.

[2] Spackeler: Die sogenannte Druckwelle, Glückauf 1928, S. 873; Der Nutzdruck als Abbaufolge, Glückauf 1929, S. 461.

diese Vorsichtsmaßregel praktisch eine Breitung verhinderte, ließ sich klar nach Beendigung des Versuches daraus ersehen, daß alle Versuchskörper, obwohl sie weit über ihre Bruchlast hinaus beansprucht worden waren, niemals Anzeichen von Bruchformen aufwiesen. Das Maß der Zusammendrückung wurde aus dem Abstand der obern und untern Preßplatte an zwei gegenüberliegenden Stellen mit Hilfe von Meßuhren auf $^1/_{100}$ mm genau ermittelt. Zur Berücksichtigung des Umstandes, daß auch die Stahlhülse und der Stempel zusammengedrückt werden, wurde bei jedem Versuch die leere Stahlform in derselben Weise beansprucht wie der Versuchskörper und die dabei gemessene Zusammendrückung bei der Berechnung in Abzug gebracht. Um Ungleichmäßigkeiten zu vermeiden, die eine etwaige Verschiebung der obern beweglichen Preßbacke hervorrufen könnte, gab man stets dem Körper eine kleine Anfangslast, meist 20 kg/cm² auf, ehe man die Einstellung der Meßuhren vornahm.

Ergebnisse und Auswertung der Versuche.

Druckfestigkeitsversuche.

Sandstein. Festigkeitsversuche an Karbonsandsteinen sind aus dem Schrifttum nicht bekannt. Der hier untersuchte Sandstein stammte aus dem Hangenden des Flözes Schuckmann-Niederbank der Karsten-Centrumgrube. Die Schichtung dieses typisch oberschlesischen Sandsteins war erkennbar, Mineralzusammensetzung und Korngröße wechselten in einem Probestück schnell, und Kohlenschmitzen zeigten oft deutlich die Schichtung an. Die Druckfestigkeit betrug bei Druckausübung senkrecht zur Schichtung im Mittel von 4 Proben 800 und parallel dazu 770 kg je cm². Die Unterschiede sind demnach unbeträchtlich. Bei allen Prüfkörpern, die der genauern und bequemern Herstellung halber Zylinder von 40 mm Dmr. und 45 mm Höhe waren, zeigten sich, wie Abb. 9 erkennen läßt, deutliche Bruchkegel.

Abb. 9. Bildung von Bruchkegeln bei Probekörpern aus Sandstein.

Tonschiefer. Für Tonschiefer liegt eine Angabe von Cordebas[1] vor, der für weiche Schiefer 80, für mittelharte 170, für sehr harte 220 und für äußerst harte (cuerelles) 300 und mehr kg/cm² Bruchbelastung angibt. Diese Werte wurden erheblich überschritten bei der zweiten von mir untersuchten Probe des Tonschiefers aus dem Hangenden des Flözes Schuckmann-Niederbank der Gräfin-Johanna-Grube.

Bei 6 senkrecht zur Schichtung gedrückten Probewürfeln betrugen die Druckfestigkeiten: 710, 780, 820, 830, 940 und 810, im Mittel also 815 kg/cm². Beim Bruch ergab sich überall eine ausgebildete Druckpyramide (Abb. 10). Derselbe gut geschichtete Tonschiefer wurde ferner bei Ausübung des Druckes parallel zur Schichtung untersucht. 4 Probewürfel ergaben 460, 670, 550 und 550, im Mittel also rd. 560 kg/cm², d. h. nur 68% oder etwa zwei Drittel der bei Ausübung des Druckes senkrecht zur Schichtung erzielten Druckfestigkeit. Bemerkenswert ist hierbei noch, daß sich keine Druckpyramiden bildeten, sondern regelmäßig Rißsysteme, in deren Keilform Spitze und Fuß der einzelnen Keile miteinander abwechselten (Abb. 11).

Abb. 10. Bruchpyramiden bei Tonschiefer; Druck senkrecht zur Schichtung.

Ferner wurde der Tonschiefer aus dem Liegenden des Flözes Schuckmann-Niederbank derselben Grube geprüft. Er war sehr undeutlich geschichtet und enthielt viel Pflanzenreste. Die Prüfung der Druckfestigkeit senkrecht zur Schichtung ergab im Mittel von 4 Proben 715 kg/cm² und bei Druckausübung parallel zur Schichtung aus 4 Proben 670 kg/cm², also 93% der erstgenannten Druckfestigkeit. Dieser unbedeutende Unterschied beruht auf der ziemlich mangelhaft geschichteten Ausbildung dieses noch dazu von Pflanzenresten stark durchsetzten Schiefers. Die Brucherscheinungen waren im Grunde denen des ersten Schiefers ähnlich, jedoch weit undeutlicher, weil hier die Gleichmäßigkeit des Materials durchaus fehlte.

Steinkohle. Während für Karbonsandsteine und Tonschiefer nur wenige Angaben im Schrifttum vorhanden sind, kennt man für Steinkohle mehr Versuchswerte. Die wohl älteste Angabe stammt aus Oberschlesien und aus dem Jahre 1875[1]. Die dort mitgeteilten Werte sind 178 kg/cm² für das Sattelflöz und 183 kg/cm² für das Gerhardflöz. Diese Werte gelten für frisch geförderte Kohle der Königsgrube. Für die Grube Königin Luise wurden frische und abgelagerte Kohlen aus 4 Flözen untersucht. Die erhaltenen Festigkeiten bewegten sich für frische Kohle zwischen 34 und 44 kg/cm², für abgelagerte waren sie höher, nämlich 43–70 kg/cm². Weshalb diese Werte gegenüber denen für die Kohlen der Königsgrube so stark abfallen, geht aus den

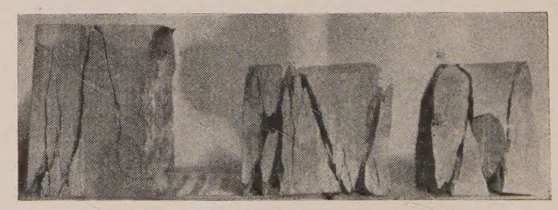


Abb. 11. Bruchkeile bei Tonschiefer; Druck parallel zur Schichtung.

Mitteilungen nicht hervor. Nach einer zweiten Angabe[2] betrug die Kohlenfestigkeit des Sattelflözes des Erbreichschachtfeldes 195,8 kg/cm²; dieser Wert entspricht etwa dem für die Königsgrube genannten.

[1] a. a. O.

[1] Mitteil. Kgl. techn. Versuchsanstalt 1883.

[2] Bericht der Preußischen Stein- u. Kohlenfallkommission, 1903, S. 147.

Vom Bureau of Mines[1] werden für Hartkohle 125–400, für Weichkohle 30–150 kg/cm² angegeben. Die von mir ermittelten Werte stimmen mit den genannten außer den Werten von der Königin-Luise-Grube ganz gut überein.

Für die Steinkohle aus dem Heinitzflöz der Gräfin-Johanna-Grube ergaben 7 Würfel folgende Festigkeitszahlen: 290, 240, 130, 240, 140, 180 und 240, im Mittel also etwa 210 kg/cm². Die Kohle aus dem Schuckmannflöz derselben Grube zeigte an 6 Würfeln 115, 280, 120, 150, 165 und 160, im Mittel also 165 kg/cm², also nur 78% der Festigkeit der Heinitzflözkohle. Bei der Mehrzahl der Würfel erfolgte der Druck unter einem explosionsartigen Knall. Schalen von 2–3 cm Stärke sprangen ab und wurden 3–4 m weit fortgeschleudert. Dem Bruch ging ein immer stärker werdendes Knistern und Abspringen kleiner Kohlenteile vorauf. Nur zum Teil war Druckpyramidenbildung erkennbar (Abb. 12); meist folgten die Risse bereits vorhandenen Haarrissen in der Kohle, eine Tatsache, welche die ungleichen Festigkeitszahlen zum Teil erklären.

Abb. 12. Bruchpyramidenbildung bei Steinkohle.

Zusammenfassend sei bemerkt, daß die oft recht beträchtlichen Unterschiede in den Festigkeitszahlen der Gesteine sowie der Kohle von hauptsächlich zwei Umständen herrühren, die auf der Natur der Gesteine und auf der Art der Versuchsbedingungen beruhen. Einmal können die Abweichungen aus der ungleichen Beschaffenheit erklärt werden, wie die deutliche Schichtung und das Vorhandensein von Pflanzenresten zeigen, die das Gestein durchsetzten. Ferner wiesen alle Gesteine und Kohlen bereits zahlreiche Haarrisse auf, die zum Teil die Schießarbeit, zum Teil aber auch der Gebirgsdruck hervorgerufen haben konnte. Die Versuchsausführung beeinflußte ebenfalls das Ergebnis, weil auch Würfel mit verschiedener Kantenlänge benutzt werden mußten. Nach den Untersuchungen von Prandtl und Rinne[2] steigt die Druckfestigkeit desselben Materials mit abnehmender Höhe des Prüfkörpers. Die Verschiedenheit der Würfel beruhte auf der großen technischen Schwierigkeit, aus dem ja bereits vorbeanspruchten Material nur Würfel mit derselben Kantenlänge herauszuschneiden. Selbst bei vorsichtigstem Arbeiten kam es vor, daß das Stück beim Sägen der letzten Würfelflächen in zur Schichtung parallele Teile zerfiel und dann gegebenenfalls nur noch ein Würfel mit kleinerer Kantenlänge hergestellt werden konnte. Dasselbe gilt in noch höherm Maße von der Herstellung der Kohlenwürfel. Auf einen einwandfreien Würfel entfiel daher viel kostspieliger Bruch. Aus den genannten Gründen können die ermittelten Druckfestigkeiten nur einen verhältnismäßigen Wertmaßstab bieten, ganz abgesehen davon, daß die Art der Prüfung, bei welcher der Druck nur auf zwei Seiten wirkte, den natürlichen Verhältnissen der Grube nicht entsprach.

Wäre die Anschauung richtig, daß in 800 m Teufe ein statischer Druck von 200 at auf dem Gestein lastet, so müßte man in dieser Teufe bereits völlig »zerdrückte«, weil über die Druckfestigkeit beanspruchte Kohle antreffen, was jedoch nicht der Fall ist. Da die Schichten nur eine geringe seitliche Ausweichmöglichkeit haben, muß man das Bestehen einer allseitigen Druckverteilung annehmen. Bei diesem Spannungszustand wird die Gesteinfestigkeit, wie ich später nachweisen werde, bereits bei Anwesenheit eines geringen Seitendruckes ganz beträchtlich erhöht. Aus diesen Gründen ist es verfehlt, der Ermittlung der Druckfestigkeit von Gesteinen auf normale Art einen großen Wert für bergmännische Betrachtungen beizumessen. Die Kenntnis des Verhältnisses der Festigkeiten der einzelnen Gesteine zueinander kann jedoch wertvoll sein.

Versuche über Rißbildung.

Sandstein. Das Gesteinmaterial für diese Versuche entsprach dem für die Druck- und die weiter folgenden Versuche verwandten. Ein Sandsteinwürfel von 10 cm Kantenlänge wurde so in die Stahlform (Abb. 3) eingesetzt, daß der Druck senkrecht zur Schichtung wirkte. Nur eine Würfelseite ließ die Form offen, so daß 5 Würfelflächen gepreßt wurden. Diese Anordnung galt auch für Schiefer und Steinkohle, damit die natürlichen Verhältnisse gewahrt blieben.

Bei langsam steigender Belastung ertönte bei 970 kg/cm² ein scharfer Knall als Ausdruck einer innern Spannungsauslösung. Kurz darauf sprang ohne

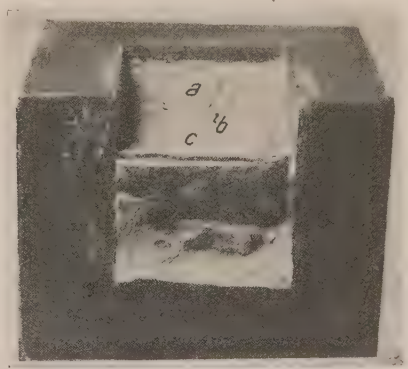
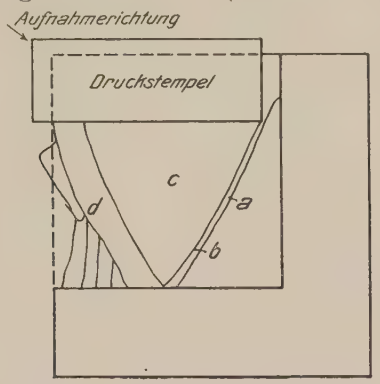


Abb. 13. Rißerscheinungen an Sandstein.

weitere Belastungssteigerung an der den Streckenstoß darstellenden offenen Würfelseite eine 1½ cm starke Schale ab. Diese Erscheinung ähnelt völlig dem bekannten »Schlagen der Stöße« oder den »Bergschüssen« bei Tunnelbauten und beim Auffahren von Strecken, die unter starker Spannung stehen. Da der übrige Würfel noch unversehrt, eine Überschreitung der Druckfestigkeit bei diesem Spannungszustand also noch nicht erfolgt war, und da sich ferner die Bruchfläche als eben und nicht mit Gesteinmehl bedeckt

[1] Coll. Guard. 1929, Bd. 139, S. 803; Bur. Min. Bull. 1929, H. 303.
[2] a. a. O.

erwies, kann als Ursache für das erste Abplatzen der Schale nur Zerrung angenommen werden. Beim Vorhandensein reiner Druckspannungen findet man die Bruchfläche stets mit fein zerriebenem Gut bedeckt, als Zeichen dafür, daß Bewegungen längs dieser Fläche stattgefunden haben (Mohrsche Flächen).



a Gleitfläche, b Rutschstreifen, c Druckkeil, d abgeplatzte Schalen.
Abb. 14. Handzeichnung zu Abb. 13.

Bei weiterer Belastung, die jedoch nicht mehr den oben genannten Wert erreichte, schob sich der Würfel unter gleichzeitiger Höhenverminderung nach der freien Fläche hinaus, wobei folgende Erscheinungen auftraten. Sobald Würfelteile über den Rand des Druckstempels hinweg bewegt wurden, lösten sich sofort weitere dünne Schalen ab, da sie in den Zustand der Entspannung gerieten. Allmählich nahmen die Schalen eine solche Lage an, daß sie nicht mehr, wie die ersten, parallel zur offenen Kante, sondern spitzwinklig dazu standen. Der Versuch wurde, als die Höhenverminderung 4 cm betrug, abgebrochen; nach Abnahme des Druckstempels zeigte sich das Bild, wie es Abb. 13 wiedergibt. Die Aufnahme wurde der bessern Sichtbarkeit wegen von der offenen Würfelseite aus schräg von oben vorgenommen. Zur Verdeutlichung dient Abb. 14, die den gedachten Querschnitt veranschaulicht. Der Vorgang war eine Bewegung unter Herausbildung typischer Rutschstreifen und Gleitflächen. Der Druckstempel ist an der

Abb. 15. Druckkeil mit Rutschstreifen (hellere Stellen).

Gleitfläche *a* unter Bildung des Rutschstreifens *b* seitlich verschoben worden und infolgedessen der fest gebliebene Druckkeil *c* entstanden. Diesen zeigt Abb. 15 mit dem heller erscheinenden Rutschstreifen. An der offenen Würfelseite stellten sich die Schalen *d*, da kein Gegendruck wie bei *a* vorhanden war, in der gezeichneten Art ein. Auffällig ist, daß der Druckkeil keine Risse aufwies.

Ob ähnliche Verhältnisse in der Grube bestehen, läßt sich wegen der erschwerten Beobachtungsmöglichkeit nicht sagen. Es ist jedoch bekannt, daß mächtige Sandsteinschichten, wenn sie in Bewegung gekommen sind, wenige, aber dafür um so stärker klaffende Risse zeigen, und daß das Abgleiten nach sicherlich vorhandenen Gleitflächen dann selbst den stärksten Grubenausbau zerstört. Ferner hat man beobachtet, daß auch der feste Sandstein auf den Druck-Bruchflächen feinsten Abrieb aufweist; wo dieser fehlt, ist Zerrung anzunehmen.

Tonschiefer. Ähnliche Beobachtungen konnten bei den gleichen Versuchen mit Tonschiefer gemacht werden. Bei 550 kg/cm² Belastung entstand die Lage, wie sie Abb. 16 wiedergibt. Auf der untern Preßplatte sind der Stahlkörper in der Seitenansicht und der bereits mit dem Versuchskörper gewanderte Preßstempel sichtbar. Eine Gesteinschale hat sich von der offenen Würfelseite abgelöst und ist ungleichmäßig stark nach der freien Seite gedrückt worden. An der obern, drückenden Preßplatte war die Bewegung gering, weil die starke Reibung zwischen Preßstempel

Abb. 16. Seitenansicht eines gepreßten Tonschieferwürfels in der Stahlform.

und Versuchskörper diesen zusammenhielt. Nach der Mitte zu wurde die abgelöste Platte stärker. Am Boden der Stahlform war der Druck am kleinsten, so daß hier die Bewegung stärker in Erscheinung trat. Ähnliche Verhältnisse kann man in Abbaustrecken wiederfinden; dort, wo die Reibung zweier Schichten, z. B. zwischen Kohle und Sandstein, groß ist, werden die Gesteinplatten länger zusammengehalten als an Stellen, an denen weiche, tonige oder lettige Lagen

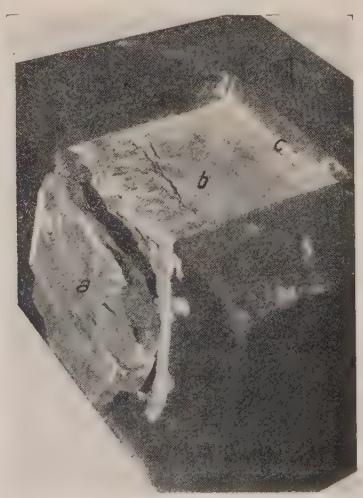


Abb. 17. Rißerscheinungen an Tonschiefer beim Pressen in der Form nach Abb. 3

die Bewegung begünstigen. Bei einer Belastung von 960 kg/cm² wurde der Versuch beendet, da die Presse keine weitere Drucksteigerung zuließ. Es zeigte sich folgende Erscheinung (Abb. 17). Die erste Gesteinschale *a* war allmählich abgefallen, sie ist nur der Deutlichkeit halber danebengestellt worden. Auf der Würfeloberfläche *b* erkennt man ein Rißsystem, das parallel zur offenen Fläche verläuft. In der Mitte des Körpers klafft der Riß am stärksten und nach den Stahlwänden hin schwächer ausgeprägt. An der hintern Stahlwand läßt sich auch hier die entstandene Rutschfläche *c* sehr schön erkennen.

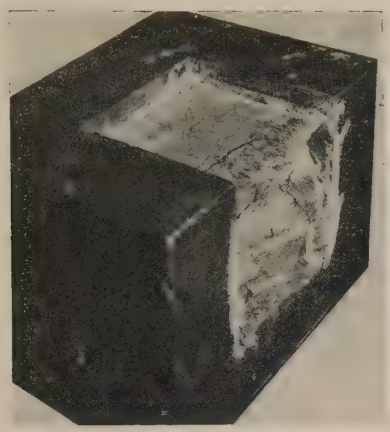


Abb. 18. Rißerscheinungen an Tonschiefer.

Mit dem zu der offenen Fläche parallel verlaufenden Rißsystem stehen Grubenbeobachtungen in Einklang. In Strecken und Abbauen sucht der Gebirgsdruck, ganz gleich, ob er als reiner Überlagerungsdruck oder als Kämpferdruck angesehen wird, die Gesteinmassen nach der offenen Fläche hin abzuschieben; dabei treten im Flöz die zum Abbaustoß parallelen Drucklagen und in den Strecken Loslösungen von Gesteinschalen auf. Ganz ähnliche Verhältnisse zeigt Abb. 18 von einem entsprechenden weitern Versuch.

Abb. 19. Rißerscheinungen bei Steinkohle (Aufnahme schräg von oben).

Steinkohle. Zum Versuch diente Steinkohle aus Abbaupfeilern des Flözes Schuckmann-Niederbank. Da die Herstellung von genau passenden Würfeln schwierig war, wurde zur Abgleichung der obern und untern Druckfläche Gips verwendet, wodurch allerdings die ersten Erscheinungen etwas verschleiert worden sind. Bei langsamer Drucksteigerung erfolgte bei 200 kg/cm² unter lebhaftem Knistern und Krebsen ein scharfer Knall, ähnlich den Pfeiler- oder Bergschüssen, wobei eine Kohlenschale mit zur offenen Seite parallel verlaufendem Riß absprang; auf der Bruchfläche war kein Abrieb zu erkennen, so daß der Vorgang auch hier eine Zerrung darstellt. Danach geriet der restliche Würfel unter beständigen kleinen Knällen in ziemlich rasche Bewegung nach der offenen Seite, wobei sich immer von neuem flache Schalen ablösten. Da die Reibung an der obern und untern Würfelfläche infolge der Gipsschicht groß war, entstand bald eine ungleichmäßige Bewegung der Schalen, die dann etwa in der Mitte ausknickten und zerbrachen. Ähnliche Verhältnisse können in den mächtigen Pfeilern Oberschlesiens und in andern Bezirken beobachtet werden, wenn die Bewegung des Kohlenpfeilers nach dem freien Abbauraum hin infolge von starker Reibung oder Unebenheit des Flözhangenden oder -liegenden gehemmt wird.

Zur Beschränkung dieser Reibung auf ein Mindestmaß wurde ein Kohlenwürfel allseitig mit einer 1 mm starken Paraffinhaut überzogen und dann in derselben Weise beansprucht. Das Abplatzen der ersten Schale erfolgte bereits bei 100 kg/cm². Bei 170 kg/cm² setzte ein rasches und gleichmäßiges Wandern der Kohle

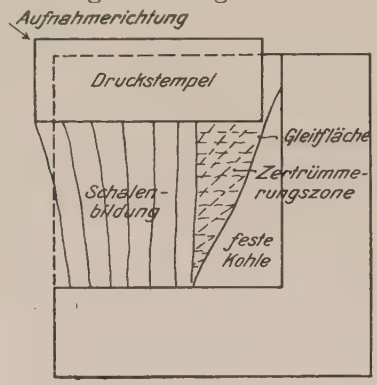


Abb. 20. Handzeichnung zu Abb. 19.

nach der freien Seite hin ein, und in regelmäßigen Abständen schoben sich etwa 1½ cm starke Schalen hinaus. Als sich die Würfelhöhe um 2 cm vermindert hatte, wurde der Versuch beendet. Das Bild nach Abnahme der Druckplatte veranschaulicht Abb. 19. Die parallel zur offenen Seite (Stoßkante) verlaufenden Risse sind gut erkennbar; an der Rückseite des Würfels befindet sich eine Zone völlig zermürbter Kohle, auf die eine Schicht festgedrückter Kohle an der Stahlwand folgt. Diese Verhältnisse entsprechen durchaus den beim Sandsteinversuch beschriebenen, nur ist statt der Rutschstreifen eine Zertrümmerungszone entsprechend der geringern Festigkeit der Kohle entstanden. Einen Querschnitt durch den Würfel gibt Abb. 20.

Versuche nach dem Verfahren von Kick.

Im Gegensatz zu den Versuchen zur Klärung der Rißbildung stehen die nach dem Kickschen Verfahren durchgeführten. Während für die reinen Druckversuche die Ausweichmöglichkeit nur nach einer Seite besteht, können die Gesteine hier nach vier Seiten ausweichen, wobei sie allerdings einen Gegendruck finden, der die Bewegung zu hemmen sucht. Dieser Gegendruck ist stets geringer als der Hauptdruck, der auf die beiden Stirnflächen der Probekörper ausgeübt wird. Insofern vermag diese Anordnung sicherlich über die Formänderung von Gebirgsschichten in allseitig gespanntem Zustand Auskunft zu geben.

Sandstein. Versuche mit kleinen Prismen aus Karbonsandstein in Kupferhülsen und mit Blei als Einbettungsstoff zeigten stets nur Bruchstruktur, irgendwelche Verformung trat niemals ein. Diese Tatsache steht mit Grubenbeobachtungen in Übereinstimmung, denn stark beanspruchte Sandsteinschichten zeigen auch dort stets Rißbildung und Zerstückelung. Das schließt jedoch nicht aus, daß sich bei langer geologischer Einwirkungsdauer auch Sandsteine bruchlos umformen können, wie das Vor-

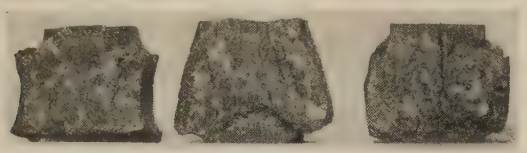


Abb. 21. Verformte Tonschieferprismen (Lötzinn als Einbettungsstoff).

handensein von gefalteten Sandsteinschichten beweist. Nur ist hier der Faktor Zeit von überragender Bedeutung, deshalb beobachtet man bei den im Verhältnis zu geologischen Zeiten kurzdauernden Druckbeanspruchungen in der Grube nur Brucherscheinungen.

Tonschiefer. Prismen aus Tonschiefer dagegen wurden unter denselben Bedingungen stark gestaucht, ohne daß sich leicht eine Trennung der Teile vornehmen ließ (Abb. 21). Bruchlose Verformung trat jedoch auch hier nicht ein, sondern die Anschliffe zeigten Verformung unter Ausbildung von Mörtelstruktur. Die durch den Druck zerstückelte und zerriebene Masse hatte sich unter dem beträchtlichen Seitendruck wieder verfestigt, wobei den kleinen Bruchstücken die Rolle des Bindemittels zugefallen war. Wie schon erwähnt, läßt sich der auf den Probekörper wirkende allseitige Druck nicht angeben. Auch die Bestimmung des achsrechten Druckes ist sehr unsicher, der jedoch sicherlich mehr als 1000 kg je cm^2 betrug. Wie Abb. 21 zeigt, trat bei allen Prismen eine starke Stauchung unter gleichzeitiger Breitung ein. Diese konnte so weit getrieben werden, daß der Einfluß der Hülsenform bei mehreren Körpern sehr schön zu erkennen war. Kopf und Fuß

Abb. 22. Hereingedrückter Mergel in einer Strecke der Grube Seegraben bei Leoben.

der Prismen waren meist weniger verformt, weil die Reibung der Hülsenenden an den harten Stahlplatten der Presse auch keine größere Breitung zuließ.

Ähnliche Gesteinverformungen unter Bruchformausbildung mit folgender Verfestigung hat man in Steinkohlengruben häufig beobachtet und ihre Beziehungen zu Gebirgsdruckfragen mehrfach untersucht. Die Gelegenheit zur Erkennung derartiger Erscheinungen bietet sich besonders beim Nachreißen der Abbaustrecken und Querschläge. Abb. 22 zeigt sehr schön, wie eine feste, dickbankige Mergelschicht in die Firste einer Abbaustrecke der Grube Seegraben bei Leoben hineingedrückt worden ist. Die erkennbare Dünnschichtung der Mergelbank hat ursprünglich nicht bestanden, sondern ist erst durch das Hereinwandern und die dadurch bedingte Bewegung auf bereits vorhandenen Schichtflächen hervorgerufen

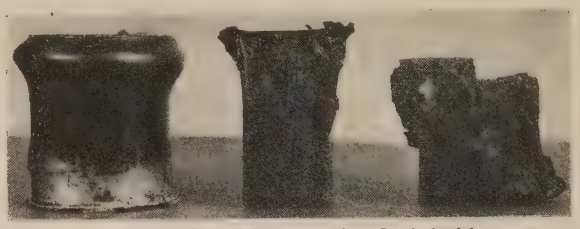


Abb. 23. Bruchformen der Steinkohle (Paraffin als Einbettungsmittel).

worden. Nachträglich hat der eingetretene Seiten- und Hangenddruck das derart beanspruchte Material wieder so verfestigt, daß es im großen Verbande als einheitlich anzusehen ist. Ähnliche Beispiele sind in den Aufsätzen von Spackeler[1] mehrfach beschrieben und gewürdigt worden. Die Ergebnisse meiner Versuche stimmen also mit Grubenbeobachtungen darin überein, daß sich Tonschiefer verformen läßt, allerdings nicht bruchlos im streng physikalischen Sinne. Der Bergmann und der Geologe bezeichnen jedoch solche Veränderungen als bruchfrei, weil sie den großen Zusammenhang der Schichten nicht aufheben.

Steinkohle. Versuche mit Steinkohlenprismen ergaben ebenfalls starke Stauch- und Breitungserscheinungen. Im Gegensatz zum Schiefer entstanden Risse in der Kohle, in die das Einbettungsmittel, hier Paraffin oder Blei, hineingedrückt wurde, was einen zusammenhängenden Körper vortäuschte (Abb. 23). Bei einem Prisma aus homogener Kennelkohle traten Rißsysteme auf, die etwa unter 45° zur Druckrichtung standen. Abb. 24 zeigt die derart beanspruchte Kohle von der Seite und Abb. 25 von oben. In dieser Abbildung sieht man links den Kopf des Prismas in Blei eingebettet und erkennt auf seiner Oberfläche Risse, die durch die stärkere seitliche Ausbauchung der Hülse hervorgerufen werden. Rechts im Bilde ist die vorsichtig abgelöste Bleikappe wiedergegeben, auf der sich die Risse deutlich eingeprägt haben. Die Erscheinungen beim Versuch decken sich mit Beobachtungen in der Grube, denn auch dort ist bei weitgehender Verformung des Schiefers die Kohle des Flözes, das dieselben Beanspruchungen erfahren hat,

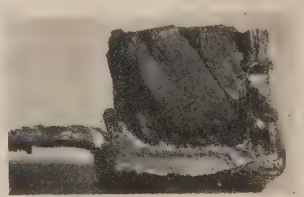


Abb. 24. Seitenansicht eines gepreßten Prismas aus homogener Kennelkohle.

[1] a. a. O.

zerrissen worden und höchstens noch infolge des Hangenddruckes in Zusammenhang geblieben. Diese Tatsache beruht wahrscheinlich auf der Struktur der Kohle. Denn man kann die Kohle als homogen ansehen, was der Tonschiefer nicht mehr ist, da seine gerichteten Glimmerplättchen ein Abgleiten längs dieser Lagen erlauben. Beim Schiefer ist also die Ausbildung von Gleitebenen möglich.

Abb. 25. Aufsicht zu Abb. 24.

Hier müssen noch einige weitere Versuche behandelt werden, welche die Verformbarkeit auf andere Art beweisen sollen. Es handelt sich um die Prägeversuche, wie sie bereits Kick an Marmor in ähnlicher Weise mit Erfolg ausgeführt hat. In eine starkwandige quadratische Stahlform, die nur eine Öffnung für die Aufnahme des Druckstempels aufwies, wurden passende Würfel eingesetzt und in Ermangelung einer geeigneten Prägematrize Geldstücke auf die Oberfläche der Probestücke gelegt. Dann ließ man den Druck stetig wachsen, bis der Stempel um die Münzstärke in die Form gedrückt war. In den Abb. 26 und 27 erkennt man sehr schön die entstandenen Negativprägungen im Schiefer und in der Kohle, ein Beweis

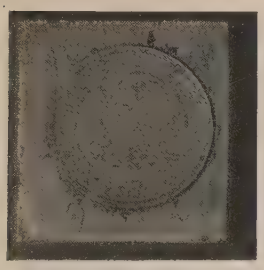


Abb. 26. Prägeversuch an Tonschiefer.

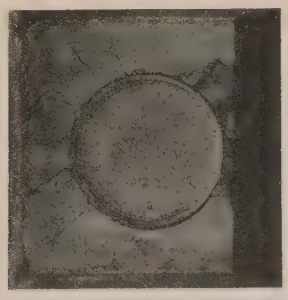


Abb. 27. Prägeversuch an Steinkohle.

dafür, daß sich beide plastisch verformen lassen. Der Prägedruck betrug beim Schiefer 720 at, bei der Steinkohle 2100 at; Kohle scheint also schwerer als Schiefer in den plastischen Zustand überzugehen. Die auf beiden Bildern radial vom Umfang der Prägung aus verlaufenden Risse sind daraus zu erklären, daß der Druck und das Material nach der unbelasteten Fläche hin ausweichen konnten. Ähnliche Rißbildungen wie beim Prägeversuch lassen sich in der Grube im Liegenden von Flözen beim Abbau von Restpfeilern beobachten. Beim Versuch stellte die hochbeanspruchte Prägefläche den Restpfeiler dar, und das Liegende um diesen Pfeiler herum oder die Abbaustrecken in seiner Nähe können mit der schwach oder unbelasteten Fläche verglichen werden.

Versuche nach dem Verfahren von Kármán.

Mit der Druckvorrichtung von Kármán wurden Versuche an Tonschiefer, Sandstein und Steinkohle ausgeführt. Als Vergleichsmaterial diente Carrara-Marmor. Dabei ergab sich, daß nur an Marmor völlig ähnliche plastische Erscheinungen auftraten, wie v. Kármán zuerst eingehend beschrieben hat. Obwohl die Versuche an den übrigen Gesteinen unter denselben Bedingungen stattfanden, wurde nur Formänderung unter Brucherscheinung festgestellt. So zeigt Abb. 28 einen Steinkohlenzylinder, der noch von

Abb. 28. Steinkohlenzylinder mit Blechmantel und Stahlkappen.

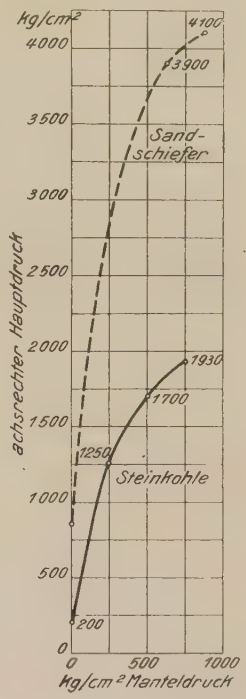


Abb. 29. Druckfestigkeiten von Sandschiefer und Steinkohle in Abhängigkeit vom Seitendruck.

der dünnen Blechschutzhülse und den beiden Stahlkappen umgeben ist. Diese Kohle war einem achsrechten Druck von 1930 at und einem Seitendruck von 750 at ausgesetzt worden. Auf der Blechoberfläche haben sich die Veränderungen des Körpers deutlich ausgeprägt. Man erkennt zwei sich kreuzende Linien, die als sogenannte Mohrsche Gleitlinien anzusehen sind und den eingetretenen Schervorgang kennzeichnen. Der obere, größere Winkel zwischen den Linien ist wahrscheinlich durch Hineinpressen der obern Zylinderhälfte in den Restkörper hervorgerufen worden. Die Kohle zeigte keine Zerstörung, konnte aber leicht nach den vorhandenen Gleitflächen getrennt werden. Ähnliche Brucherscheinungen zeigten Schiefer und Sandstein. Hier verliefen die Bruchflächen meist parallel zur achsrechten Hauptdruckrichtung.

Insofern können die Ergebnisse als mit Grubenbeobachtungen übereinstimmend angesehen werden, da man plastische Verformungen von Gesteinen und Kohle als Folge von Abbauwirkungen nicht kennt. Dazu stehen jedoch Beispiele derartiger Umformungen als Folge von gebirgsbildenden Vorgängen nicht im Gegensatz, weil es sich hier nicht, wie beim Versuch und beim Abbau, um kurzzeitige Beanspruchungen, sondern um solche von geologischer Zeitdauer handelt.

Ferner ist für die Frage der Gesteinfestigkeit in der Tiefe und wohl noch mehr für die Frage des »latenten Arbeitsvermögens« die Tatsache bedeutsam, daß bereits bei Vorhandensein eines geringen Seitendruckes die Druckfestigkeit der Gesteine das Mehrfache von derjenigen beträgt, die bei fehlendem

Seitendruck gefunden worden ist. In Abb. 29 sind die Druckfestigkeiten von Sandschiefer und Steinkohle in Abhängigkeit vom Seitendruck eingezeichnet. Beiden Kurven ist der steile Anstieg bei kleinem Seitendruck gemeinsam, bei höherm verflachen sie sich erheblich. Überraschend wirkt die äußerst hohe Druckfestigkeit bei diesem allseitigen Spannungszustand. Diese Tatsache ist für das Problem des »latenten Arbeitsvermögens« äußerst wichtig. Sandschiefer und Sandsteine, die im mechanischen Verhalten gleichzustellen sein dürften, werden bei allseitiger Spannung trotz ihrer geringen Zusammendrückbarkeit sehr hohe elastische Kräfte aufnehmen können, die bei eintretender Entspannung wieder freiwerden; manche Gebirgsdruckerscheinungen lassen sich daraus erklären.

Elastizitätsversuche.

Die Ergebnisse der Elastizitätsversuche geben die nachstehenden Schaubilder wieder, und zwar sind in dem Koordinatennetz auf dem waagrechten Ast die gesamten Längenänderungen λ in $^1/_{1000}$ mm und auf dem senkrechten die Spannungen in kg/cm² aufgetragen, bei denen die Ermittlung der Längenänderungen erfolgt ist.

Da die Elastizität unter Bedingungen bestimmt worden ist, die den natürlichen Verhältnissen — allseitiger Spannungszustand — nicht gerecht werden, können die Ergebnisse nur einen verhältnismäßigen Wertmaßstab liefern. Der Seitendruck betrug bei den Versuchen 1 at.

Sandstein. Der Karbonsandstein aus dem Hangenden des Flözes Schuckmann-Niederbank wurde bei Druckausübung sowohl senkrecht (Abb. 30) als auch parallel zur Schichtung (Abb. 31) untersucht. In Abb. 30 geht die Entlastungskurve infolge der beträchtlichen elastischen Nachwirkung nicht mehr in die Belastungskurve zurück; es ist eine deutliche Hysteresisschleife entstanden. Die bleibende Längenänderung beträgt bei Nullast $^9/_{1000}$ mm. Ferner ist bei dieser Druckrichtung die Längenänderung größer als beim Druck parallel zur Schichtung, die Elastizität also in Richtung der Schichtung größer als senkrecht dazu. Diese Tatsache haben Bauschinger und Graf bereits vermerkt. In Abb. 31 konnte die Entlastungskurve nicht mehr aufgenommen werden, weil sich unter der Last von 420 kg/cm² von dem Prisma ein großes Stück parallel zur Schichtfläche ablöste, so daß der Versuch abgebrochen werden mußte. Die Auswertung der Ergebnisse soll weiter unten für alle untersuchten Gesteine gemeinsam gegeben werden.

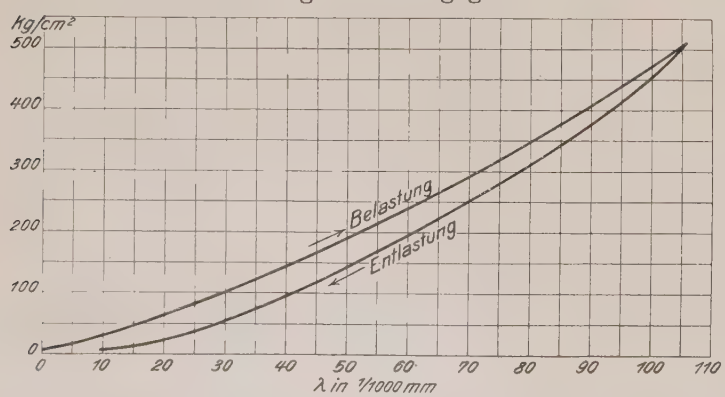


Abb. 30. Elastizitätsversuch mit Sandstein aus dem Hangenden des Flözes Schuckmann-Niederbank bei Druckausübung senkrecht zur Schichtung.

Tonschiefer. Die entsprechenden Kurven für einen Tonschiefer aus dem Hangenden des Flözes Schuckmann-Niederbank zeigt Abb. 32. Die Druckbeanspruchung erfolgte hier, wie bei allen untersuchten Tonschiefern, parallel zur Schichtung; wegen der Dünnbankigkeit des Schiefers war es nämlich nicht möglich, aus den Blöcken Prismen herzustellen, deren Längsseiten senkrecht zur Schichtung standen. Das Schaubild zeigt einen fast geradlinigen Verlauf

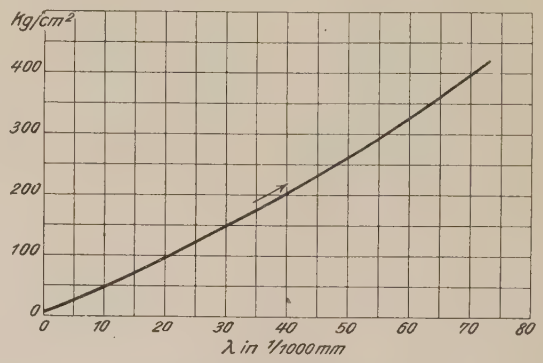


Abb. 31. Versuch wie in Abb. 30 bei Druckausübung parallel zur Schichtung.

der Belastungskurve. Weit stärker als beim Sandstein tritt hier die Hysteresisschleife hervor. Die bleibende Formänderung bei Nullast beträgt $^3/_{1000}$ mm, ist also gering. Bei dem 10 min später an demselben Stück vorgenommenen zweiten Versuch sind die Kurven parallel verschoben. Gegenüber dem ersten Versuch ist die Längenänderung geringer, die Fläche der

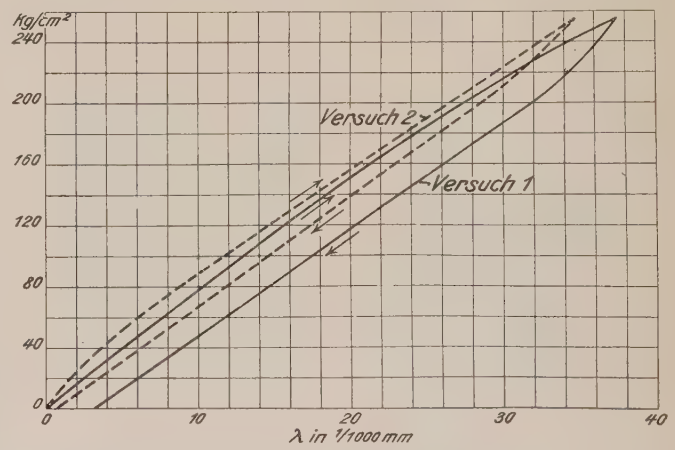


Abb. 32. Versuche an einem Tonschiefer aus dem Hangenden des Flözes Schuckmann-Niederbank.

Schleife kleiner und die bleibende Formänderung nur noch $^{0,8}/_{1000}$ mm. Offensichtlich haben sich die elastischen Eigenschaften verstärkt, denn je näher beieinander die Belastungs- und die Entlastungslinien liegen, je weniger Fläche also vorhanden ist, desto elastischer ist der Körper, da er ja seine alte Form schnell wieder einzunehmen sucht. Er wäre vollkommen elastisch, wenn sich die Kurven deckten. Bei allen von mir durchgeführten Elastizitätsversuchen hat sich ergeben, daß die Hysteresisfläche mit der wachsenden Anzahl von Belastungen und Entlastungen abnimmt, daß der Körper also elastischer im physikalischen Sinne wird. Der Grund für dieses Verhalten kann in dem durch Belastung erfolgten Schließen vorhandener kleiner Hohlräume (Poren) liegen, wodurch der Körper dichter

und damit gegen Verformung widerstandsfähiger wird.

Ganz ähnliche Verhältnisse zeigt Abb. 33 für ein zweites Schieferprisma derselben Art, bei dem die Belastung bis auf 350 kg/cm² gesteigert worden war. Die bleibende Längenänderung nach der Entlastung ist auch hier sehr gering.

Dasselbe gilt, wie aus Abb. 34 hervorgeht, für den Schiefer aus dem Liegenden des Flözes Schuckmann-Niederbank. Dieser wies keine ausgesprochene Schichtung auf, war vielmehr regellos mit Pflanzenfaserabdrücken durchzogen und, da er aus dem unmittelbaren Liegenden stammt, ein typischer Liegendpacken. Die gesamten Längenänderungen sind größer als beim ersten Schiefer, seine Elastizität war also kleiner, d. h. er setzte der Zusammendrückung weniger Widerstand entgegen. Die bleibende Längenänderung betrug beim ersten Versuch $^{11,3}/_{1000}$ mm und bei der Wiederholung des Versuches nur noch $^{1,5}/_{1000}$ mm. Sehr deutlich tritt auch hier der verschieden große Flächeninhalt der Hysteresisflächen hervor.

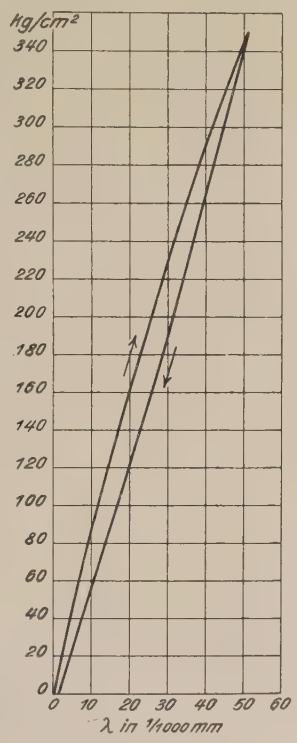


Abb. 33. Versuch wie in Abb. 32 bei Steigerung der Belastung auf 350 kg/cm².

Steinkohle. Zur Untersuchung der Kohlen dienten Prismen aus dem Schuckmann- und dem Heinitzflöz. Wie aus den Kurven der Abb. 35 und 36 hervorgeht, ist bei der Kohle aus dem Schuckmannflöz die gesamte Längenänderung im Vergleich zu der bei den Gesteinen sehr groß; dasselbe gilt für die bleibenden Änderungen bei Nullast. Diese werden nur nach zweimaliger Belastung und Entlastung geringer. Auch hier treten die Unterschiede in der Größe der Hysteresisflächen bei Wiederholung des Versuches deutlich hervor.

Bei der Kohle aus dem Heinitzflöz (Abb. 37 und 38) bleiben die Längenänderungen um mehr als 50 % hinter denen der Kohle aus dem Schuckmannflöz zurück, die also weniger elastisch als jene ist. Der Unterschied der Hysteresisflächen ist hier ebensowenig beträchtlich wie die bleibende Längenänderung.

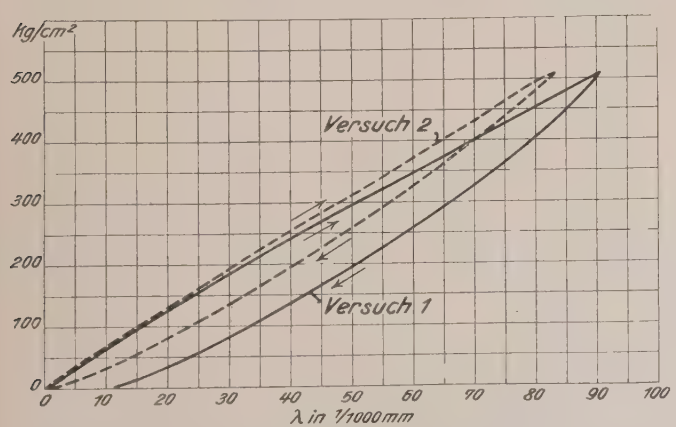


Abb. 34. Untersuchung eines Tonschiefers aus dem Liegenden des Flözes Schuckmann-Niederbank.

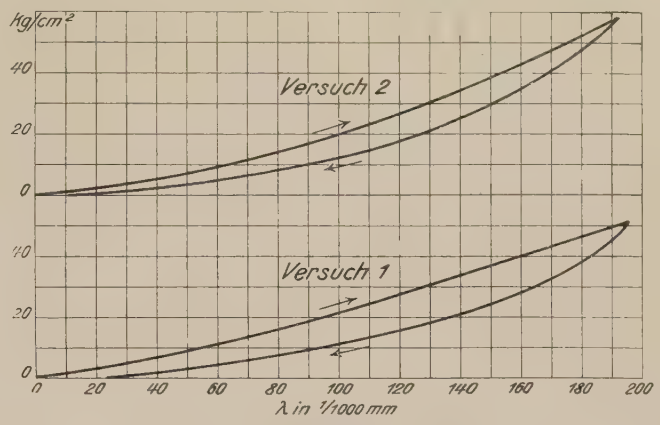


Abb. 35. Untersuchung von Steinkohle aus dem Schuckmannflöz.

Diese Kohle war auch erheblich druckfester; augenscheinlich steht hier die Druckfestigkeit in einem gewissen Verhältnis zur Elastizität.

Die gesamten bei den verschiedenen spezifischen Drücken gemessenen Längenänderungen aller untersuchten Gesteine gibt Abb. 39 zusammenfassend wieder. Der Tonschiefer aus dem Hangenden des Flözes Schuckmann-Niederbank zeigt dabei die niedrigsten Werte. Die elastische Widerstandsfähigkeit, also die große Righeit, drückt sich in den kleinen Werten der Längenänderung aus. An zweiter Stelle folgt der Tonschiefer aus dem Liegenden, dann in größerm Abstande der Sandstein. Daß sich dieser erheblich stärker als der Tonschiefer zusammendrücken läßt, beruht auf dem Mineralbestand des Gesteins. Der im Sandstein vorherrschende Gemengteil, der harte und spröde Quarz, weist überraschenderweise trotz seiner großen Härte den größten Wert der Zusammendrückbarkeit auf. Der Quarz hat den gegenüber allen bisher untersuchten Mineralien hohen Wert $K = 2{,}7 \cdot 10^{12}$, seine Elastizität ist, wie schon Reich angibt, geringer als die von Glimmer, nämlich nur $5{,}11 \cdot 10^{11}$ gegenüber $6{,}08 \cdot 10^{11}$. Beim Sandstein ist neben dem Porenvolumen sowie den Quarzen und ihrer Verzahnung vor allem das Bindemittel für das elastische Verhalten maßgebend. Die Steinkohlen erreichen die größten gesamten Längenänderungen. Die Längenänderung betrug z. B. für die Kohle des Schuckmannflözes bei einer Belastung von 70 kg/cm² das 11fache gegenüber dem Sandstein unter gleicher Belastung sowie das 25fache und das 29fache gegenüber dem Schiefer aus dem Liegenden und aus dem Hangenden desselben Flözes. Die Kohle ist also als recht zusammendrückbar anzusehen.

In Abb. 40 sind auf dem waagrechten Ast des Koordinatennetzes die steigenden Werte des E-Moduls, nach dem CGS-System berechnet[1], und auf dem senkrechten die Spannungen in kg/cm² eingezeichnet, bei denen die Ermittlung der E-Werte erfolgt ist. Die geringsten Werte zeigen die beiden Steinkohlen, ihnen folgen der senkrecht und der parallel zur Schichtung beanspruchte Sandstein, sodann der Tonschiefer aus dem Liegenden und zuletzt der aus dem Hangenden

[1] Berechnungsangaben s. Auerbach: Handbuch der Physik, 1908, Bd. 1.

des Schuckmannflözes. Die Elastizitätskurven der Kohlen, besonders aber die der Sandsteine, haben steigendes Bestreben, das auf die Verfestigung des

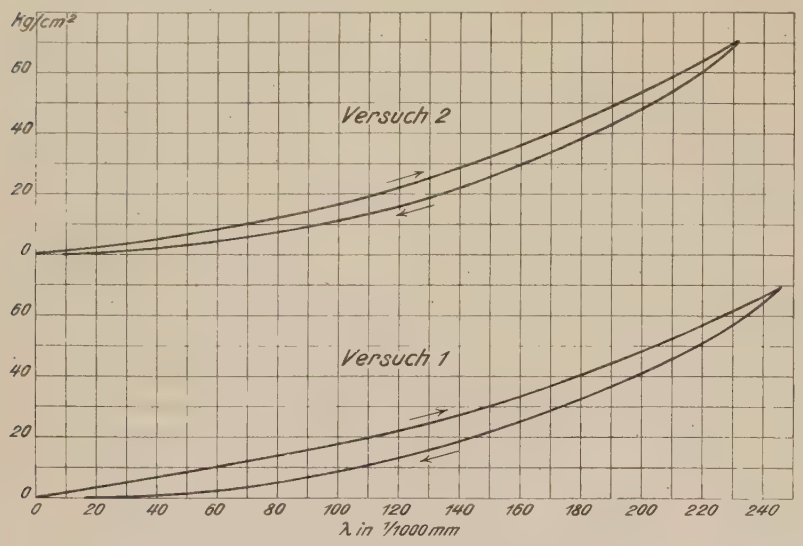


Abb. 36. Untersuchung von Steinkohle aus dem Schuckmannflöz.

Materials durch die Zusammendrückung kleiner Hohlräume zurückzuführen ist. Bei den Kurven der Tonschiefer ist besonders beachtenswert, daß sie stetig fallende Neigung aufweisen, was auf der Struktur und der angewandten Beanspruchung parallel zu der ausgezeichneten Schichtung beruht. Das schiefrige

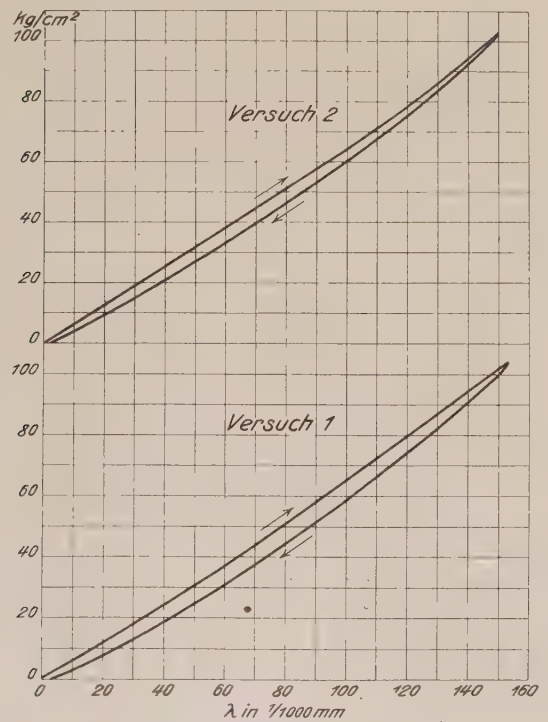


Abb. 37. Untersuchung von Steinkohle aus dem Heinitzflöz.

Gefüge vermag dem Gestein keinen innern Halt zu geben, da die Schieferungsebenen Inhomogenitätsflächen vorstellen, an denen entlang Verschiebung und Ausweichen möglich sind.

Die Versuche haben gelehrt, daß die Karbongesteine elastisch anisotrop sind, denn bei Druck parallel zur Schichtung zeigen sie höhere E-Werte als bei Druck senkrecht dazu. Für Sandstein sind die entsprechenden Werte 5,3 und $4{,}3 \cdot 10^{11}$. Für Tonschiefer ist hier auf die Untersuchung von Gamba hinzuweisen, der nachgewiesen hat, daß die Elastizität beim Schiefer parallel zur Schichtung $2^1/_2$ mal

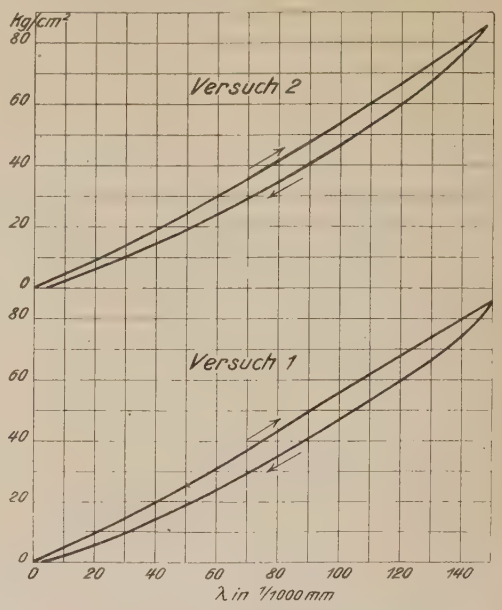


Abb. 38. Untersuchung von Steinkohle aus dem Heinitzflöz.

so groß wie senkrecht dazu ist. Steinkohle steht im elastischen Verhalten auf derselben Stufe wie etwa Tuff (0,2 bzw. $0{,}6 \cdot 10^{11}$). Sie ist recht zusammendrückbar und weist deshalb die kleinsten E-Werte auf. Da im Bergbau die Hauptbeanspruchung senkrecht oder annähernd senkrecht zur Schichtung erfolgt, muß bei Tonschiefer der entsprechende Wert von Gamba, nämlich $3{,}7 \cdot 10^{11}$, benutzt werden. Die Übernahme dieses Wertes läßt sich damit rechtfertigen, daß der von Gamba gefundene Wert mit dem vom Verfasser ermittelten befriedigend übereinstimmt.

Ob die gefundenen E-Werte die natürlichen Verhältnisse widerspiegeln, ist aus den oben angegebenen Gründen zweifelhaft; sicherlich werden die mitgeteilten Zahlen als zu niedrig anzusehen sein. Diese Annahme wird durch die seismischen Beobachtungen gestützt, denn die aus der Geschwindigkeit der longitudinalen Wellen errechneten E-Werte sind höher als die durch die nur unter 1 at Seitendruck vorgenommenen Elastizitätsversuche ermittelten. Demgegenüber stehen die Gesteine in der Tiefe, zumal wenn Bewegungen durch Abbauwirkung erfolgen, unter beträchtlichem Seitendruck, der ihre Elastizität erhöhen dürfte. So wird sich wahrscheinlich der Sandstein, wie aus seiner aufsteigenden E-Kurve (Abb. 40) hervorgeht, in der Tiefe erheblich elastischer verhalten als der Tonschiefer, dessen E-Kurve stetig fällt. Daher wird beim Sandstein auch die elastische Kraftwirkung bei Aufhebung der Beanspruchung mehrfach größer als die des Tonschiefers sein und die plötzlich freiwerdende gewaltige Energie des Sandsteins Erscheinungen (z. B. Gebirgsschläge, Gasausbrüche) hervorrufen können, die man wohl seiner hohen Elastizität zuschreiben darf.

Kompressionsversuche.

Sandstein. Die Frage der Zusammendrückbarkeit der Karbongesteine, die zuerst Langecker[1] in ihrer Bedeutung für das »latente Arbeitsvermögen«

[1] a. a. O.

der Gesteine erkannt hat, sollten die nachstehend geschilderten Versuche klären. Wegen der Unmöglichkeit, den in bergmännischen Tiefen herrschenden allseitigen Druck rechnerisch zu ermitteln, wurde ein Spannungszustand gewählt, bei dem zwei Hauptspannungen gleich, die dritte aber größer war. Da ferner aus verschiedenen Überlegungen gefolgert

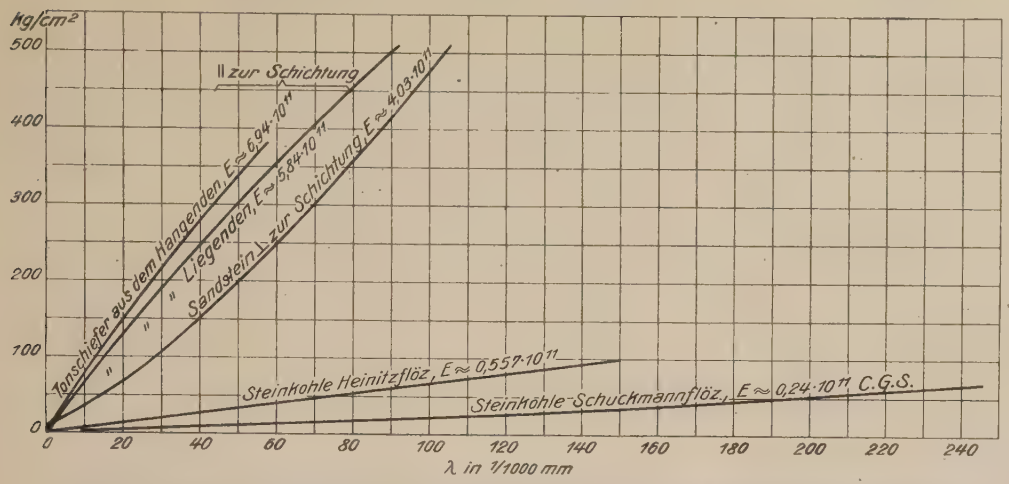


Abb. 39. Zusammenstellung der Längenänderungen bei den untersuchten Gesteinen.

werden kann, daß der Stoßdruck im Abbau sicherlich mehrere 100 kg je cm² beträgt, wurden die Kompressionsversuche zunächst unter einer achsrechten Belastung von 0–500 kg/cm² vorgenommen, dann aber auch bei 1000 kg je cm² durchgeführt.

Die Kompression wurde bei 200, 300, 400 und 500 kg/cm² ermittelt und in Hundertteilen der Höhe des Versuchszylinders errechnet und angegeben.

Für den erwähnten Sandstein ergaben sich dabei folgende Werte:

Druck kg/cm²	Gesamte Kompression %
200	0,19
300	0,27
400	0,30
500	0,40
1000	0,57

Bei 300 kg/cm² beträgt also die gesamte Kompression bereits 0,27 %, bei 1000 mehr als 0,5 %.

Tonschiefer. Beim Schiefer ist die Gesamtkompression, wie aus den nachstehenden Ergebnissen hervorgeht, im Bereich bis zu 500 kg/cm² etwas geringer als beim Sandstein und nur bei 1000 kg/cm² größer.

Druck kg/cm²	Gesamte Kompression %
200	0,16
300	0,20
400	0,27
500	0,32
1000	0,71

Steinkohle. Die Steinkohle liefert unter allseitigem Druck die höchsten Werte der Gesamtkompression von allen untersuchten Gesteinen. Bei 400 kg/cm² ist der Wert 4- und 3½mal so groß wie der des Tonschiefers und des Sandsteins.

Druck kg/cm²	Gesamte Kompression %
200	0,63
300	0,83
400	1,08
500	1,25
1000	2,22

Als Hauptergebnis ist nach den vorstehenden Zahlenreihen zu vermerken, daß die Kompression der Karbongesteine bereits bei 100 kg/cm² achsrechter Belastung und einem allerdings rechnerisch nicht erfaßbaren, aber geringern Seitendruck weit mehr als 0,1 % beträgt. Ferner ist festgestellt worden, daß sich die untersuchten Gesteine beim plötzlichen Aufhören der Belastung mehr oder weniger stark ausdehnen. Die federnde Kompression konnte jedoch bei der beschriebenen Versuchseinrichtung wegen der Unsicherheit der Bestimmung dieser kleinen Werte nicht rechnerisch ausgewertet werden. Die Elastizitätsversuche geben darüber einigen Aufschluß. Aus Gründen der Ähnlichkeit besteht die Wahrscheinlichkeit, daß die Gesteine nach Verlauf einer längern Entspannungszeit wieder ihre ursprüngliche Gestalt annehmen. Würden nämlich die Karbongesteine und die Kohle die Fähigkeit haben, ihre einmal erlittene Zusammendrückung völlig beizubehalten, also gewissermaßen »totgedrückt« sein, so könnten sie keine elastischen Kräfte aufnehmen und ihr »latentes Arbeitsvermögen« wäre gleich Null.

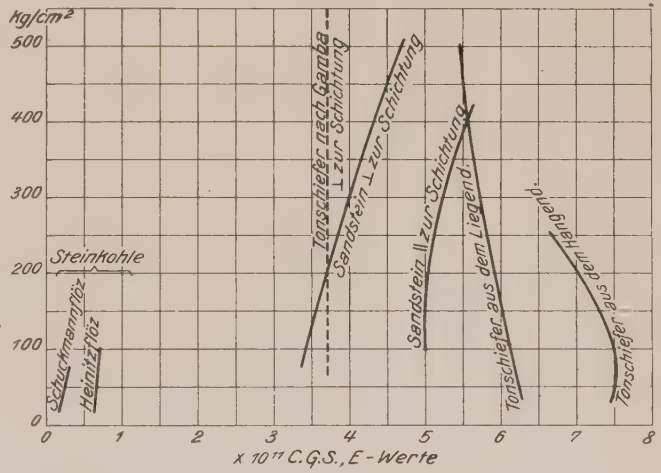


Abb. 40. Elastizitätsmodule der untersuchten Gesteine.

Aus den Versuchen ist zu schließen, daß die wichtigsten Vertreter der Karbongesteine unter allseitigem Druck hohe Belastungen aufnehmen und so gewissermaßen als Kraftspeicher wirken können; ferner, daß sie, wenn sich die Belastung verringert, imstande sind, diese Kräfte zum größten Teil wieder nach außen an ihre Umgebung abzugeben. Das Gebirge selbst kann also unter geeigneten Be-

dingungen innere Kräfte frei werden lassen, die der Gewinnungsarbeit im Flöz als willkommene Hilfe zur Verfügung stehen.

Nutzanwendung der Versuche für die Klärung einiger Gebirgsdruckfragen.

Geht man bei der Beurteilung der Versuchsergebnisse von den im bergmännischen Schrifttum angeführten Anschauungen über die Ursache des Gebirgsdruckes und von Beobachtungen untertage aus, so können die Versuche zur Klärung der nachstehend erörterten Fragen benutzt werden.

Entstehung und Erklärung der Trompeterschen Zone.

Im Anschluß an ältere Forschungen von Trompeter[1] stellten v. Willmann[2], Kommerell[3] und Langecker[4] die Theorie auf, daß sich die unter der Gebirgslast zusammengedrückten Gesteine in den Abbauraum hinein ausdehnen und sich dabei entspannen. Danach sollen sie nicht mehr die Fähigkeit besitzen, Druck aufzunehmen und zu übertragen, was nur bei erneuter Zusammendrückung möglich wäre. Für die so entstehende entspannte Zone, in der die Gesteine infolge der veränderten Spannungsverhältnisse andere Eigenschaften als in der Umgebung dieser Zone aufweisen, prägte Spackeler[5] den Begriff der Trompeterschen Zone.

Für das Vorhandensein einer solchen Zone sprechen von den erwähnten Versuchen diejenigen von Adams und Bancroft an durchlochten und unter hohem allseitigem Druck gesetzten Gesteinen (Abb. 1), bei denen sich um den künstlichen Hohlraum herum deutlich sichtbare Zonen veränderten entspannten Gesteins haben erkennen lassen. Ferner steht die Tatsache, daß sich bei meinen Versuchen an dem fünfseitig gepreßten Würfel Gesteinplatten von gleicher Fläche wie die der gepreßten Körper ablösten, mit entsprechenden Erscheinungen in der Trompeterschen Zone in Übereinstimmung.

Latente Plastizität und latentes Arbeitsvermögen der Gesteine.

Heim[6] und Rziha[7] stellten auf Grund ihrer Beobachtungen in tiefen Alpentunneln die Theorie der latenten Plastizität der Gesteine auf. Diese Plastizität kann sich aber erst auswirken, also nicht mehr latent sein, wenn der bestehende Gleichgewichtszustand künstlich gestört wird. In meinen Versuchen hat die Theorie für Karbongesteine in bergmännischer Teufe keine Stütze gefunden, da weder beim Nebengestein, Sandstein und Schiefer, noch bei der Kohle eine bruchfreie Umformung gelungen ist. Diese erfolgte vielmehr unter Ausbildung von Bruchflächen, auf denen allerdings teilweise eine erneute Verfestigung eintrat. Demnach sind scheinbar bruchfreie Verformungen entweder an geologische Zeiten gebunden, oder sie sind als »pseudoplastisch« anzusehen, da erst Bruch und dann wieder Verfestigung eintritt; zu der letztgenannten Gruppe müssen die als Abbauwirkungen angesehenen Verformungen gezählt werden.

[1] Trompeter: Die Expansivkraft im Gestein als Hauptursache der Bewegung des den Bergbau umgebenden Gebirges, 1899.

[2] v. Willmann: Über einige Gebirgsdruckerscheinungen in ihren Beziehungen zum Tunnelbau, 1911.

[3] Kommerell: Statische Berechnung von Tunnelmauerwerk, 1912.

[4] Langecker: Gebirgsdruckerscheinungen im Kohlenbergbau, erläutert an der Grube Hausham in Oberbayern, B. H. Jahrb. 1928, S. 31.

[5] Spackeler: Der Druck auf den Kohlenstoß, Glückauf 1929, S. 1753.

[6] a. a. O.

[7] Rziha: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst, 1872.

Auf diese ältere Theorie baute Langecker auf Grund seiner Beobachtungen in der oberbayerischen Pechkohle die Theorie des latenten Arbeitsvermögens auf. Wie schon bei der Theorie der Trompeterschen Zone ausgeführt worden ist, nimmt er eine Kompression der Gesteine durch das überlagernde Gebirge an, so daß sie bei der Entspannung ihre für die Kompression aufgewandte Arbeitsmenge zurückzugeben vermögen. Mit Hilfe dieses latenten Arbeitsvermögens suchen die rückwärtigen Gesteinmassen das entspannte Gestein der Trompeterschen Zone in den Abbauraum hineinzudrücken; dieses Arbeitsvermögen ist für die Gewinnung der Kohle von Wichtigkeit, weil es sich im Flöz durch Vordrückung und Zerklüftung des Kohlenstoßes wirksam äußert.

Durch die Versuche ist Langeckers Auffassung im Grundgedanken bestätigt worden. Die Zusammendrückbarkeit aller Gesteine, besonders die hohe der Kohle, hat nachgewiesen werden können. Dagegen zeigen die Elastizitätsversuche, daß das latente Arbeitsvermögen der Kohle klein ist gegenüber dem des Nebengesteins. Der E-Modul beweist, daß sich gerade Kohle mit verhältnismäßig geringem Kraftaufwand zusammendrücken läßt. Diese Feststellung steht im Einklang mit Langeckers Beobachtungen über die starke Vorschiebung und die Zerklüftung des Kohlenstoßes; die Erscheinung wird jedoch nur so lange anhalten, wie dabei keine wesentlichen Widerstände zu überwinden sind. Gerade die von Langecker beschriebenen Verhältnisse in Oberbayern zeigen, und später von Spackeler[1], Ende[2] u. a. gebrachte Beispiele bestätigen, daß die durch die Absenkung des Hangenden oder durch das Hochquellen des Liegenden vor dem Kohlenstoß erzeugten Widerstände groß genug sind, um ein weiteres Vorschieben der Kohle zu verhindern.

Danach muß man annehmen, daß die Vorschiebung des Kohlenstoßes hauptsächlich infolge des geringen Widerstandes der Kohle gegen Verformung durch den Kämpferdruck nur in geringem Maße durch das latente Arbeitsvermögen der Kohle erfolgt. Der Verlauf der E-Kurven sowie die nachgewiesene ungeahnt hohe Druckfestigkeit des Sandsteins unter dem allseitig wirkenden Druck der Tiefe lassen erwarten, daß für seine Zusammendrückung außerordentlich starke Kräfte nötig sind. Die hohe Druckfestigkeit des Sandsteins stimmt, abweichend vom Tonschiefer, mit seinem Verhalten beim Abbau überein, daß nämlich der Sandstein auch auf große freie Flächen trägt, und daß oft nicht einmal Schießarbeit solche Sandsteinplatten zerstören kann. Das latente Arbeitsvermögen des Sandsteins ist demnach als sehr groß anzusehen. Seine geringe Zusammendrückbarkeit ergibt bei der Entspannung nur kleine Wege, über welche die Kräfte wirken; dafür sind diese Kräfte, sobald sie frei werden, recht groß.

Bildung von Schlechten, Drucklagen und künstlicher Schieferung.

Schlechten. Im Anschluß an die Frage der latenten Plastizität und an meine Versuche in dieser Richtung läßt sich für die Frage der Schlechtenbildung vielleicht eine weitere Erklärung geben. Danach können natürliche Schlechten als durch Bruch-

[1] Glückauf 1929, S. 1753.

[2] Ende: Bildung von Schlechten und Drucklagen in Steinkohlenflözen, Glückauf 1929, S. 1653.

oder Schervorgänge und sodann teilweise erfolgte Wiederverfestigung entstandene Flächen geringen Widerstandes, also als »Schwächeflächen« aufgefaßt werden. Die Annahme, daß die Schlechten vielleicht Mohrsche Flächen darstellen, und die Tatsache, daß sie leichter und zahlreicher in der Kohle als im Schiefer und Sandstein auftreten, stimmt mit meinen Versuchen an Kohle nach dem Kickschen und dem Kármánschen Verfahren überein.

Drucklagen. Die Drucklagen sollen nach Gillitzer[1] und Ende[2] parallel zur Druckrichtung, nach den Anschauungen von Langecker[3] durch die Entspannung an der Grenze der Trompeterschen Zone entstehen. Nach den Ergebnissen meiner Würfelversuche sind vielleicht beide Auffassungen richtig, da sich die vorderste Gesteinschale im Sinne der von Cloos vertretenen Theorie als Ausdruck einer Zerrspannung abgelöst hat, dahinter dagegen etwa Mohrsche Flächen entstanden sind, an denen entlang die Bewegung erfolgt ist.

Künstliche Schieferungsbildung. Eine oft beobachtete und bereits beschriebene Schieferungserscheinung am bankigen Tonschiefer zeigt Abb. 41

Abb. 41. Schieferungserscheinung an bankigem Tonschiefer in einer Abbaustrecke des Schachtes Gottes Hilfe in Lugau.

in einer Abbaustrecke des Schachtes Gottes Hilfe in Lugau. Das mit gleichzeitiger Senkung und Verfestigung verbundene Hereindrücken des Tonschiefers in die offene Strecke stellt eine vereinigte Druck- und Zugwirkung dar; auf den »vorgezeichneten« Schichtflächen ist dadurch eine ungleichmäßige Bewegung entstanden, die zu einer gegenseitigen Verschiebung kleiner Gesteinteile geführt hat und dann dem Auge als sogenannte Druckschieferung sichtbar wird. Im Bilde läßt sich deutlich erkennen, daß keine bruchfreie Formänderung eingetreten ist, wie es auch dem Versuch entspricht. Dasselbe zeigen die entsprechenden Abbildungen zu meinen Versuchen mit Kohle.

[1] Gillitzer: Das Wesen des Gebirgsdruckes und dessen Ausnutzung beim Abbaubetriebe des Mansfelder Bergbaus, Glückauf 1928, S. 977.

[2] a. a. O.

[3] a. a. O.

Gebirgsschläge und Gasausbrüche.

Die Ergebnisse der Versuche über das elastische Verhalten des Sandsteins und der Kohle liefern ferner die Möglichkeit, die eigenartigen Erscheinungen der Gebirgsschläge und der plötzlichen Gasausbrüche zu erklären.

Dies gilt zunächst für die in tiefen Tunneln und in Grubenbauen beobachteten Bergschüsse, die mit großer Gewalt erfolgenden Herausschleuderungen flacher Schalen aus den Stößen, wobei die abgeplatzten Schalen in ihren ursprünglichen Raum nicht mehr hineinpassen. Über die Entstehung der eigentlichen Gebirgsschläge dürfte im Anschluß an die Untersuchungen von Lindemann[1] die herrschende Meinung dahin gehen, daß in dem hangenden Sandstein große Biegungskräfte aufgespeichert sind, die beim Reißen des Sandsteins und bei seiner Rückkehr in die gestreckte Lage zu einer starken elastischen Schlagwirkung auf das Flöz und das Liegende führen. Diese Auffassung wird durch die Versuchsergebnisse bestätigt.

Der hohe E-Modul des Sandsteins, d. h. die große in der elastischen Formänderung aufgesammelte Energiemenge tritt nicht nur bei der Kompression, sondern bei jeder innerhalb der E-Grenze bleibenden Formänderung in Erscheinung. Erfolgt nun der Bruch, so wird augenblicklich jeder einzelne Teil der großen Sandsteinplatte für sich ein elastischer Körper, der in seine Ruhelage zurückzugehen sucht und dabei seine aufgespeicherte Energie in dem Umfang wieder frei läßt, wie ihm diese Rückkehr gelingt. Da das Freiwerden dieser großen Energiemengen in sehr kurzer Zeit erfolgt, dürfte Lindemanns Auffassung von der Entstehung der Gebirgsschläge in ihrem Grundgedanken zutreffen.

Darüber hinaus erlauben die Ergebnisse der angestellten Untersuchungen, auch eine Erklärung für die plötzlichen Gasausbrüche zu geben. Da nämlich die Umformungen der Steinkohle selbst bei hohem Druck nicht plastisch, sondern unter Bruchbildung und Wiederverfestigung erfolgen, ist im Augenblick der Zertrümmerung auch ein Freiwerden großer Gasmengen zu erwarten, die infolge der in der latenten Energie des Sandsteins beruhenden Pressung nach einem Ausweg suchen.

Zusammenfassung.

Nach Anführung der ältern Untersuchungen an Naturgesteinen werden verschiedene im bergmännischen Laboratorium der Technischen Hochschule Breslau nach verschiedenen Verfahren durchgeführte Versuche an Karbongesteinen beschrieben und ihre Ergebnisse zur Klärung verschiedener Gebirgsdruckfragen herangezogen.

[1] Lindemann: Gebirgsschläge im rheinisch-westfälischen Steinkohlenbergbau, Glückauf 1926, S. 293.

Druck von C. W. Haarfeld, Essen

Lebenslauf.

Ich wurde am 7. September 1903 als Sohn des Königlichen Kreistierarztes und Veterinärrates Joseph Müller in Horka, Kreis Rothenburg (O.-L.), geboren.

Nach zweijährigem Besuch der Ortsschule trat ich in die Vorschule des Gymnasium Augustum in Görlitz ein und blieb an dieser Anstalt bis zur Reifeprüfung im Jahre 1922. Danach leistete ich das vorgeschriebene praktische Jahr in verschiedenen Bergbaubezirken ab und wurde im Wintersemester 1923 an der Technischen Hochschule Breslau immatrikuliert. Im Februar 1928 bestand ich die Diplomhauptprüfung in der Fachrichtung Bergbau. Seit dem 1. April 1928 bin ich als Assistent am Lehrstuhl für Bergbaukunde und Bergwirtschaftslehre an der Technischen Hochschule Breslau tätig.